



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

MULTIFUNKČNÍ SENZOR

MULTIFUNCTION SENSOR

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jakub Tománek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jiří Dřínovský, Ph.D.

BRNO 2018

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Elektronika a sdělovací technika**

Ústav radioelektroniky

Student: Bc. Jakub Tománek

ID: 155251

Ročník: 2

Akademický rok: 2017/18

NÁZEV TÉMATU:

Multifunkční senzor

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Podrobně se seznámte s možností realizace multifunkčního senzoru s bezdrátovou komunikací pro měření a logování parametrů okolí pro oblast zemědělství (teplota, vlhkost, tlak, intenzita osvětlení, množství srážek, rychlost větru, vodivost půdy, apod.). Senzor bude napájen z baterie dobíjené solárním panelem umožňujícím samostatný provoz s minimální spotřebou, dále bude umožňovat napájení z externího napájecího zdroje. Pro potřeby solárního napájení a dobíjení interní baterie navrhnete a realizujete potřebnou elektroniku. Komunikace s řídicí jednotkou (PLC) bude realizována bezdrátovým komunikačním systémem ideálním pro tyto aplikace, který bude umožňovat vytváření komunikační sítě mezi jednotlivými sensory a přenos dat do nadřazeného systému.

Navrhnete možná řešení multifunkčního senzoru pro připojení senzorů pro měření vlastností půdy, intenzity osvětlení, meteorologických podmínek, CO₂ apod. Nejvhodnější řešení realizujte a odzkoušejte nasazení senzorů v terénu. Proveďte analýzu takto získaných dat.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] FRÝZA, T., Mikroprocesorová technika. Elektronické skriptum. Brno: FEKT VUT v Brně, 2008.

[2] KAMMER, D., MCNUTT, G., SENESE, B. Bluetooth - Application Developer's Guide. Syngress, 2002.

Termín zadání: 5.2.2018

Termín odevzdání: 17.5.2018

Vedoucí práce: Ing. Jiří Dřínovský, Ph.D.

Konzultant:

prof. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Abstrakt

Cílem diplomové práce je seznámení se s možnostmi realizace multifunkčního sensoru určeného pro agrikulturní účely. Práce se v teoretické rovině zabývá principy měření environmentálních veličin. Následně jsou vybrány sensory jenž jsou schopné měřit příslušné veličiny. V práci jsou rozebrány možnosti bezdrátové komunikace. Pozornost je věnována především komunikačním modulům of výrobce DIGI®. Hlavní část práce popisuje fyzickou realizaci multifunkčního sensoru. Zde je podrobně rozebráno jaké komponenty jsou vybrány na realizaci s přihlédnutím k obecným požadavkům na realizaci. Na konci práce je popsán program obsluhující multifunkční sensor.

Klíčová slova

Multifunkční sensor; Agrikulturní sensory; Bezdrátová komunikace; DIGI®

Abstract

The aim of the diploma thesis is to get acquainted with possibilities of realization of a multifunctional sensor for agricultural purposes. The theoretical work deals with the principles of measurement of environmental variables. Subsequently, sensors are selected which can measure the environmental variables. The thesis discusses the possibilities of wireless communication. Attention is paid to the communication modules of the DIGI® manufacturer. The main part describes the physical implementation of the multifunctional sensor. Here is a detailed breakdown of what components are selected for implementation with adherence to general implementation requirements. At the end of the work is described a program serving multifunctional sensor.

Keywords

Multifunctional sensor; Agriculture sensors; Wireless communication; DIGI®

Bibliografická citace:

TOMÁNEK, JAKUB. Multifunkční sensor. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2018. 48 s., 19 s. příloh. Diplomová práce. Vedoucí práce: Ing. Jiří Dřínovský, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že svoji diplomovou práci na téma Multifunkční sensor jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne

.....
(podpis autora)

Experimentální část této diplomové práce byla realizována na výzkumné infrastruktuře
vybudované v rámci projektu CZ.1.05/2.1.00/03.0072

Centrum senzorických, informačních a komunikačních systémů (SIX)
operačního programu Výzkum a vývoj pro inovace.

OBSAH

Seznam obrázků	viii
Seznam tabulek	ix
Úvod	1
1 Koncept Multifunkčního sensoru	2
1.1 Analýza trhu	2
1.2 Dataloggery	2
1.3 Koncept	2
1.4 Konstrukce	4
2 Sensory	5
2.1 Meteorologická stanice	5
2.2 Měření parametrů půdy	9
2.3 Sensor CO ₂	13
2.4 Měření parametrů vzduchu	15
2.5 Měření teploty	16
3 Komunikační rozhraní	17
3.1 Požadavky na komunikaci	17
3.2 Dostupné bezdrátové komunikační technologie	17
3.3 LPWAN	18
3.4 LoRa®	19
3.5 DIGI®	20
4 Hardware	24
4.1 Koncept	24
4.2 Blokové schéma	24
4.3 Vstupní napájecí část	25
4.4 Baterie	27
4.5 Nabíječka baterií	28
4.6 Buck-Boost konvertor	29

4.7	Boost konvertor	31
4.8	Analogová napájecí část.....	32
4.9	Mikroprocesor:.....	34
4.10	Paměť	35
4.11	Digitální rozhraní	35
4.12	Analogové rozhraní.....	35
4.13	Spotřeba energie.....	38
4.14	Životnost baterií	39
4.15	Deska plošných spojů.....	40
5	SOFTWARE	44
5.1	Program multifunkčního sensoru	44
5.2	Seznam příkazů	45
	Závěr	46
	Literatura	48
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	51
	A Schémata	52
	B Desky	61
	C Seznam součástek	65
	D Půdní sensory	69
	E Půdní dataloggery	70
	F RTD měření	71

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 globeLog datalogger (převzato z [20])	3
Obrázek 2 Sensor s dataloggerem (převzato z [21])	4
Obrázek 3 Ultrasonický anemometr (převzato z [10])	5
Obrázek 4 Meteorologická stanice (převzato z [11])	6
Obrázek 5 Zapojení anemometru a větrné korouhvičky (převzato z [11])	7
Obrázek 6 Rozhraní mezi řídicím MCU a meteorologickou stanicí	8
Obrázek 7 Půdní sensor (převzato z [15])	11
Obrázek 8 Absorbance CO ₂ (převzato z [7])	14
Obrázek 9 Nedisperzní IR vs. disperzní IR (převzato z [7])	14
Obrázek 10 Sensor BME280 (převzato z [2])	15
Obrázek 11 Rozdělení platinových sensorů dle tolerance (ppřevzato z [22])	16
Obrázek 12 Srovnání bezdrátových komunikačních technologií (převzato z [4])	17
Obrázek 13 Srovnání bezdrátových komunikačních technologií (převzato z [22])	18
Obrázek 14 Architektura LoRaWAN	19
Obrázek 15 Architektura buňkové síťové technologie DiGiMesh (převzato z [34])	20
Obrázek 16 RF moduly vlevo XBee® 868LP, vpravo XBee® SX (převzato z [29])	22
Obrázek 17 RF moduly Xbee® S2C DiGiMesh® 2.4 rozdílná provedení	22
Obrázek 18 Napájecí část multifunkčního sensoru	24
Obrázek 19 Druhá část blokového schématu multifunkčního sensoru	25
Obrázek 20 vstupní napájecí část	26
Obrázek 21 I-V obecná charakteristika solárního panelu	26
Obrázek 22 nabíječka baterií	28
Obrázek 23 TPS36031 závislost efektivity konverze na výstupním proudu	30
Obrázek 24 Buck-Boost konvertor schéma	31
Obrázek 25 MCP1640 grafy	32
Obrázek 26 Boost konvertor schéma	32
Obrázek 27 analogová napájecí část	33
Obrázek 28 napájecí kaskáda zdrojů	34
Obrázek 29 Vnitřní schéma obvodu AD7124	36
Obrázek 30 Tři vodičové RTD měření	36
Obrázek 31 Diferenční a single-ended napět'ové měření	37
Obrázek 32 Proudové měření	38
Obrázek 33 Složení DPS upraveno a převzato z [42]	40
Obrázek 34 SATURN PCB Toolkit výpočet USB 2.0 diferenciálního páru	41
Obrázek 35 Kompenzace délky vodiče pomocí meandru	42
Obrázek 36 Program multifunkčního sensoru	44

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Převodní tabulka směru větru	8
Tabulka 2 Porovnání modulů Xbee	23
Tabulka 3 Porovnání baterií.....	27
Tabulka 4 Spotřeba energie multifunkčního sensoru.....	39
Tabulka 5 Životnost baterií.....	39
Tabulka 6 USB 2.0 diferenciální pár hodnoty impedancí.....	41
Tabulka 7 Seznam příkazu multi funkčního sensoru	45

ÚVOD

Práce se zabývá realizací multifunkčního sensoru MFS pro získávání dat agronomického charakteru. MFS je koncipován jako modulární zařízení, ke kterému je možno dle potřeby připojovat různé typy i počty sensorů. Získaná data se prostřednictvím bezdrátové komunikace přeposílají do uživatelské aplikace, kde se dále zpracovávají. Dále se data ukládají na interní paměťové uložště. MFS je učen pro získávání následujících informací:

- Vlastnosti zeminy (teplota, vlhkost)
- Atmosférické vlivy (množství srážek, rychlost a směr větru)
- Měření úrovně oxidu uhličitého CO₂
- Měření úrovně osvětlení
- Měření vlastností vzduchu (teplota, vlhkost, tlak)

Měřené data slouží k optimalizaci v růstových procesech rostlin, budoucího plánování sadby, optimálnímu dávkování vody, hnojiv a dalších látek. To umožňuje ve výsledku zlevnit rostlinou produkci a zlepšit její kvalitu.

MFS má dvě hlavní místa použití. První koncept je použití sensoru v uzavřeném prostoru například v růstových komorách či sklenících. Zde je předpoklad, že MFS nebude obsahovat meteorologickou stanici na měření atmosférických vlivů, a naopak zde bude použito většího množství půdních sensorů. Každý jeden půdní sensor pro jednu růstovou nádobu obsahující zeminu či růstový roztok.

Další případ použití MFS je v otevřeném terénu, kde naopak postačuje menší množství půdních sensorů a je zde vyžadována meteorologická stanice. Rovněž je zde potřeba větší dosah bezdrátové komunikace, a to řádově stovky metrů až nízké jednotky km.

1 KONCEPT MULTIFUNKČNÍHO SENSORU

1.1 Analýza trhu

Na současném trhu lze pořídit všemožné typy agrikulturních [15], meteorologických, hydrometeorologických [11] a enviromentálních sensorů [2]. Ve většině případů se jedná o jednoúčelová zařízení specializující se na měření konkrétní veličiny, či specifických vlastností dané látky, prostředí. Při potřebě měřit určitý soubor veličin zasahující do více oblastí je nutné využít několik typů sensorů. Sensory jsou z pravidla každý od jiného výrobce. Každý výrobce má u svého sensoru definované jiné komunikační rozhraní. Komunikační rozhraní jsou různých typů od digitálních [6], bezdrátové [17], až po analogové [11]. Velký soubor různých typů komunikačních rozhraní je problematický.

Většina výrobců specializujících se na měření konkrétních veličin, dodává kromě daného sensoru i takzvané dataloggery [18][19] viz příklad dataloggerů pro půdní sensory příloha E.

1.2 Dataloggery

Dataloggery jsou zařízení, které slouží k získávání měřených veličin. Měřené veličiny jsou získávány ze sensorů. Sensory mohou být umístěny přímo v dataloggeru nebo se k dataloggeru připojují prostřednictvím konkrétního komunikačního rozhraní. Datalogger standardně obsahuje paměť pro dlouhodobé ukládání měřených veličin. Dále může obsahovat zobrazovací display a ovládací prvky pro komunikaci s uživatelem [18].

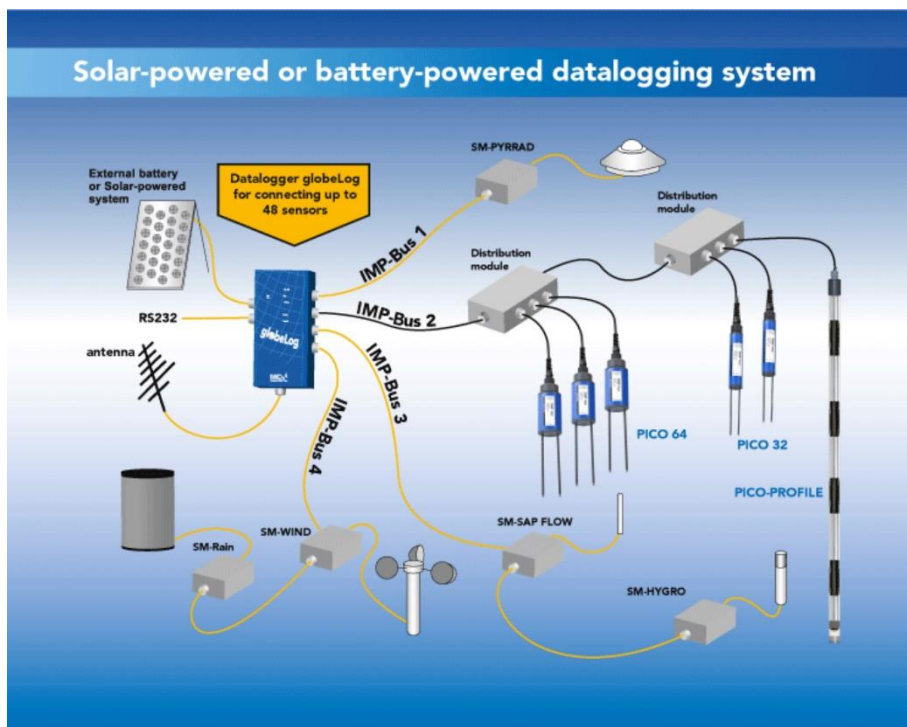
Naměřená data z dataloggeru se mohou přímo zobrazovat na displeji dataloggeru, ukládat do paměti, nebo posílat do různých externích aplikací či databází k tomu určených. Posílání dat může být realizováno drátovými nebo bezdrátovými komunikačními technologiemi. Rovněž je možnost data dlouhodobě ukládat do paměti a poté je vyčíst najednou například do PC či tabletu. To může být provedeno prostřednictvím standardních rozhraní jako je USB či Bluetooth [18][19].

Multifunkční sensor MFS je ve své podstatě datalogger. Snaha je vytvořit MFS pro co nejvíce univerzální použití. Univerzální použití spočívá v možnosti připojovat různé typy sensorů, které pracují s různými typy komunikačních rozhraní. Sensory jsou mnohdy od výrobce zakončeny příslušným konektorem jako například RJ11[11], 3.5 stereo Jack, a další. Rovněž mohou být zakončeny pouze kabelovým svazkem. Svazek pak lze připojit do systému prostřednictvím svorkovnice nebo krimpovat na potřebný typ konektoru. Z tohoto hlediska je velmi komplikované realizovat MFS tak aby schopen pracovat s nejrůznějšími typy sensorů.

1.3 Koncept

Řešením různorodosti sensorů je vytvořit systém multifunkčního MFS, který je složen s více částí. Myšlenka více částí vychází z toho, že každá část systému bude určena ke specifickému účelu. Jednotlivé části systému budou mezi sebou komunikovat

prostřednictvím standardizovaného komunikačního rozhraní. Systém bude obsahovat jednu hlavní jednotku, ke které se budou ostatní části systému připojovat. Hlavní jednotka bude obsahovat hlavní komunikační rozhraní pro komunikaci a přenos dat ze systému MFS a zprostředkování dat uživateli. Příklad realizace takového systému je na Obrázek 1.



Obrázek 1 globeLog datalogger (převzato z [20])

Na Obrázek 1 je vidět systém, který nabízí výrobce CMT Moisture Meters. Systém se skládá z několika částí. Hlavní jednotka systému je datalogger. K dataloggeru jsou připojeny distribuční moduly. K distribučním modulům se připojují samotné senzory pro měření jednotlivých veličin. Sensory slouží k měření půdní vlhkosti, půdní teploty, meteorologických jevů, intenzity osvětlení. Datalogger obsahuje bezdrátovou komunikační jednotkou. Datalogger může být napájen ze solárního panelu. Distribuční moduly jsou s dataloggerem propojeny standardizovanou komunikační sběrnici IMP-Bus. K dataloggeru je možno připojit až 48 různých senzorů [20].

Nevýhoda tohoto konceptu je nutnost použití distribučních modulů pro připojení samotných senzorů k dataloggeru. Distribuční moduly mohou být realizovány různými způsoby. Realizace se liší v závislosti na konstrukci samotných senzorů, které jsou k distribučnímu modulu připojeny. Každý senzor má specifické komunikační rozhraní pro komunikaci s distribučním modulem. Z toho důvodu se liší hardwarová realizace jednotlivých distribučních modulů. Cena takového systému je vyšší oproti konfiguraci sensor-datalogger (viz Obrázek 2) z důvodu nutnosti použití distribučních modulů. Avšak systém má i své výhody. Hlavní výhodou je v modularitě. Systém není striktně vázán na konkrétní typy ani počet použitých senzorů.



Obrázek 2 Sensor s dataloggerem (převzato z [21])

Myšlenka distribučních modulů, které slouží ke specifické funkci či komunikaci s danými typy sensorů může být realizována také díky tzv. Shield modulům [38].
Systém multifunkčního sensoru MFS by mohl být realizován podobným způsobem.

1.4 Konstrukce

Multifunkční sensor MFS je konstruován jako zařízení pro použití ve venkovním prostředí. Z toho plynou požadavky na odolnost proti vniku vody, a cizích mechanických těles. MFS musí splňovat stupeň krytí nejméně IP67. Toho se docílí vložением veškeré elektroniky do uzavřené plastové krabičky. Vstupně výstupní periferie MFS, umístěné vně krabičky budou procházet skrz plastové průchodky.

2 SENSORY

Pro zajištění vstupních dat disponuje MFS několika druhy sensorů.

2.1 Meteorologická stanice

Zajišťuje souhrnné informace o množství srážek, rychlosti a směru větru. V současné době jsou na trhu různé metody pro měření rychlosti a směru větru. Mezi velmi přesné a robustní zařízení patří tzv. ultrasonický anemometr viz Obrázek 3. Klasické koncepty jsou pak realizovány větrnou korouhvičkou a anemometrem viz Obrázek 4. Měření množství srážek je realizováno srážkoměrem. Srážkoměr je zpravidla řešen jako nádoba za zachycování vodních srážek viz Obrázek 4.

2.1.1 Ultrasonický anemometr

Jedná se o moderní zařízení kombinující funkci měření rychlosti a směru větru. Mezi jeho výhody patří eliminace jakýchkoliv pohyblivých částí a z toho plynoucí bezúdržbovost. Je předurčen i pro použití v extrémních podmínkách. Může pracovat v rozsahu teplot -50°C až 70°C díky vlastním topným tělesům, které udržují celou konstrukci při použitelné pracovní teplotě. S tím však souvisí nevýhoda, a to jest relativně vysoké výkonové nároky na provoz topných těles. Topná tělesa mohou spotřebovávat až 150 W. Celé zařízení splňuje stupeň ochrany nejméně IP67 [9][10].



Obrázek 3 Ultrasonický anemometr (převzato z [10])

Ultrasonický anemometr měří rychlost větru detekováním časových diferencí ultrasonických pulsů mezi dvěma protilehlými zvukovody. Časové difference vznikají vlivem větru. Jedná se ve své podstatě o Dopplerův jev, kde se vlivem rychlosti a směru

větru zpomaluje či zrychluje ultrasonická vlna. Tím vznikají příslušné časové difference, ze kterých je následně vypočítaná rychlost a směr větru [10]. Vzhledem k vysoké pořizovací ceně ultrasonických anemometrů je od tohoto řešení upuštěno a pro použití s MFS je zvolena klasická varianta meteorologické stanice obsahující anemometr a větrnou korouhvičku.

2.1.2 Meteorologická stanice

Pro potřeby MFS nejlépe vyhovuje meteorologická stanice od firmy ARGENT Data Systems. Její přednosti jsou nízká pořizovací cena a jednoduchá implementace do systému MFS. Mezi nevýhody patří nemožnost pracovat pod bodem mrazu z důvodu omezení pohybu mechanických částí vlivem námrazy. Stanice zajišťuje informace o množství srážek, rychlosti a směru větru. Základní komponenty jsou srážkoměr, anemometr a větrná korouhvička. Komponenty jsou umístěny na nosné konstrukci viz Obrázek 4. Větrná korouhvička a anemometr jsou umístěny na horním rameni nosné konstrukce. Srážkoměr je umístěn na spodním rameni [11].



Obrázek 4 Meteorologická stanice (převzato z [11])

2.1.3 Srážkoměr

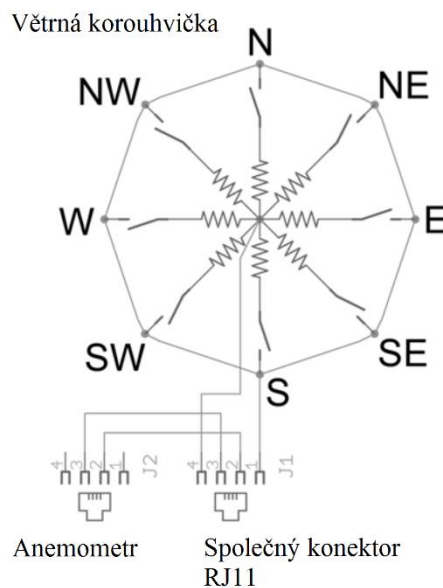
Jedná se samo vyprazdňovací nádobu kbelíkového typu. Každých 0.2794 mm srážek napršených do nádoby zapříčiní jedno sepnutí kontaktu pro a vypuštění nádoby. Celkové množství srážek je stanoveno čítačem počítajícím impulsy, respektive spínání kontaktu. Srážkoměr je zakončen kabelovou koncovkou RJ11 [11].

2.1.4 Anemometr

Hrníčkový typ anemometru slouží k měření rychlosti větru. Rychlost větru 2.4 km/h odpovídá jednomu sepnutí kontaktu za sekundu. Převodní charakteristika mezi rychlostí větru a počtem sepnutí kontaktu je lineární. Anemometr je rovněž zakončen koncovkou RJ11 a je připojen na vnitřní vodiče konektoru viz Obrázek 5 [11].

2.1.5 Větrná korouhvička

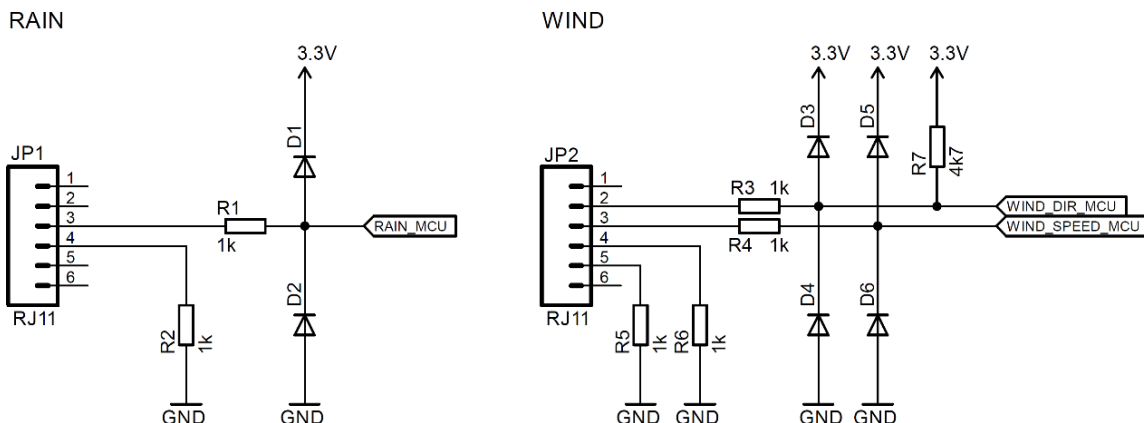
Je schopna rozeznat až 16 směrů příchozího větru. Větrná korouhvička se skládá z 8 přepínačů viz Obrázek 5. Každý přepínač je připojen na rezistor s rozdílnou nominální hodnotou. Otáčení korouhvičky způsobuje spínání přepínačů. V jednu chvíli mohou být sepnuty jeden až dva kontakty. Stav přepínačů určuje výsledný výstupní odpor, který je viditelný na výstupních svorkách korouhvičky. Směr větru se tedy získá prostřednictvím měření výstupního odporu. Korouhvička je zakončena rovněž RJ11 konektorem [11].



Obrázek 5 Zapojení anemometru a větrné korouhvičky (převzato z [11])

2.1.6 Zapojení meteorologické stanice

Větrná korouhvička a anemometr jsou vedeny v jednom kabelovém svazku a jsou zakončeny koncovkou RJ11. Srážkoměr má svůj vlastní kabelový svazek a rovněž je zakončen končen koncovkou RJ11 [11]. Během zapojení musíme tedy dbát na to, aby se vzájemně neprohodily oba kabely. Hrozila by nefunkčnost systému. Na Obrázek 6. je rozhraní mezi řídicím MCU a meteorologickou stanicí.



Obrázek 6 Rozhraní mezi řídicím MCU a meteorologickou stanicí

Pro měření rychlosti větru a množství srážek je využito dvou vstupních pinů na řídicím MCU. Piny mají nastavený interní pull-up rezistory, a detekují logikou nulu.

K měření směru větru je využit integrovaný AD převodník v MCU. Převodní tabulka směru větru a napětí na vstupním pinu AD převodníku viz Tabulka 1. Pro správnou detekci směru větru je třeba dbát na vstupní rozsah a rozlišovací schopnosti AD převodníku, neboť viz Tabulka 1. napětíové úrovně nemají v některých případech příliš velký rozdíl. Tato skutečnost bude řešena průměrováním měřené hodnoty na straně řídicího MCU.

Tabulka 1 Převodní tabulka směru větru

Směr větru	Odpor na svorkách větrné korouhvičky	Napětí na vstupu AD převodníku ¹
[°]	[Ω]	[V]
0	33k	2.536111111
22.5	6.57k	1.332200358
45	8.2k	1.506521739
67.5	891	0.324614552
90	1k	0.353571429
112.5	688	0.269140338
135	2.2k	0.638709677
157.5	1.41k	0.457622739
180	3.9k	0.959574468
202.5	3.14k	0.826236882
225	16k	2.040458015
247.5	14.12k	1.943092105
270	120k	3.046543779
292.5	42.12k	2.669266055
315	64.9k	2.860585885
337.5	21.88k	2.271321696

2.1.7 Směrová orientace meteorologické stanice

Větrná korouhvička zprostředkující informaci o směru větru má jisté nevýhody. Hlavní nevýhoda je, že udává směr větru vzhledem k svojí ose viz Obrázek 4. Tedy záleží na poloze, v níž je meteostanice fyzicky nainstalována. Z toho plyne, že směr větru 0° jenž je získán od meteostanice nemusí nutně znamenat, že vítr fouká od geologického severu. Z toho důvodu je nutné údaj o směru větru získaný od větrné korouhvičky korigovat.

Jedna z variant je použití magnetometru [5] pro získání přesného směru geologického severu. Magnetometr musí být nainstalován na známé a neměnné poloze vzhledem k meteorologické stanici. Následně se určí skutečný směr geologického severu a zkoriguje se údaj o směru větru. Toto řešení není závislé na instalované pozici MFS, avšak může mít problémy s kalibrací magnetometru. Často je třeba u zařízení obsahující magnetometry provádět kalibrace. Kalibrace požaduje otočení magnetometru ve všech třech osách. Tento aspekt může být problematický z důvodu připojené kabeláže k MFS atd.

Další možnost je nainstalovat meteostanici tak, aby horní rameno nosné konstrukce vždy směřovalo předem určený směr. K tomu lze využít obyčejný kompas. Kompas bude pevně umístěn na horním rameni nosné konstrukce meteorologické stanice. Tím se zajistí vždy správná orientace. Toto řešení je na první pohled jednoduché, ale hrozí zde chyba určení směru větru z důvodu špatné instalace (uživatel musí meteorologickou stanici vždy správně zorientovat), pootočení meteorologické stanice vlivem vnějších vlivů. Ani cenově zde není přílišná úspora oproti řešení s magnetometrem.

2.2 Měření parametrů půdy

Půda je akumulace sypkého materiálu vzniklého na zemském povrchu mechanickým i chemickým zvětráváním hornin a obsahující různě velkou příměs organických látek [12]. Pro účely agronomického charakteru je mnoho vlastností, které půda nabývá. Cílem této práce není popisovat detailně vlastnosti půdy. Největší význam v mnoha agrikulturních aplikacích zahrnující hydrologii, precizní agrikulturu a plánování nové sadby mají parametry půdy jako jsou teplota, vlhkost, obsah solí. Tyto parametry jsme schopni relativně přesně měřit [13].

Dnešní trh nabízí půdní sensory pro měření půdní vlhkosti, teploty a vodivosti. Sensory se vyrábějí v nejrozličnějších variantách lišících se v počtu měřených parametrů, přesnosti, principem měření, hloubkou proniknutí do půdy a následnou kompatibilitou s datalogery, které slouží k vyhodnocení měřených dat. Prakticky všichni výrobci profesionálních půdních sensorů dodávají ke svým sensorům své datalogery. Každý výrobce má zpravidla definované jiné komunikační rozhraní mezi senzorem a datalogerem. Nejčastěji se vyskytuje výstup v podobě analogového signálu. Nechybí však komunikační standardy jako je RS232, USART, SDI-12 apod. Rovněž ceny takovýchto hotových sensorů dosahují až desetitisíce Kč. Navíc jak je zmíněno je třeba si opatřit i příslušný dataloger. Tabulka s aktuálními sensory dostupnými na trhu je uvedena v příloze A. Ceny jsou poptány u oficiálního distributora pro ČR. Na trhu se dají rovněž pořídit různé polotovary půdních sensorů. Standardně obsahují dvě elektrody, mezi kterými probíhá měření půdy. Zde je použito nejjednoduššího principu měření. Měření je založeno na půdní rezistivitě. Z rezistivity se dále určují výsledné parametry půdy. Výhoda těchto řešení je jejich cena. Samozřejmě přesnost měření je velmi sporná. Navíc zde nejsou korekce vycházející ze známých parametrů

půd jako jsou typy půd (př. písčité, hlinité atd.). Profesionální sensory tyto korekce obsahují. Standardně se typ půdy zadává před měřením do datalogeru [13][14].

2.2.1 Půdní teplota

Způsobů, jak měřit teplotu je celá řada. Mezi hlavní možnosti patří použití termočlánků, NTC a PTC termistorů, platinových teplotních sensorů a monokrystalických Si sensorů. Tyto sensory mají známou převodní charakteristiku mezi měřenou teplotou a vnitřním odporem.

Další možností je použití hotových čipu, které v sobě mají implementován celý systém a teplotu předávají prostřednictvím digitálního komunikačního rozhraní.

Sensor či hotový čip pro měření teploty je v rámci půdního sensoru umístěn tak aby jeho tepelný kontakt s půdou byl co nejlepší. Cíl je minimalizovat tepelný odpor mezi půdou a tělem teplotního sensoru. K tomu lze s výhodou využít kovových elektrod viz Obrázek 7, jejichž tepelný odpor je minimální. Sensor se může integrovat přímo do měřicí elektrody nebo do její těsné blízkosti.

2.2.2 Půdní vlhkost

Půdní vlhkost Φ [1] je definována následujícím vztahem:

$$\Phi = \frac{V_v}{V}$$

kde V_v je objem vody obsažené v půdě a V je objem půdy. Nejčastěji se udává v procentech. Pro měření půdní vlhkosti se používá několik měřících technik.

Klasická metoda měření půdní vlhkosti zahrnuje odebrání vzorku měřené půdy a provedení vypaření vlhkosti či chemickou reakci. Metoda zahrnuje termo-gravitační a kalcium karbidové techniky [16].

Termo-gravitační technika je široce používaná pro měření půdní vlhkosti. Měřený vzorek vlhké půdy je sušen 24 h při 105 °C. Objem vody, a tedy i půdní vlhkost je měřena na základě hmotnostního rozdílu mezi původní vlhkou a vysušenou půdou. Pro organické půdy je třeba snížit teplotu sušení na 50–70 °C. Tato technika zajišťuje přesné měření půdní vlhkosti a není závislá na obsahu solí v půdě ani na typu půdy. Avšak se jedná o destruktivní metodu. Měřený vzorek půdy nelze opětovně měřit a je tedy znehodnocen [16].

Kalcium karbidová technika je rychlá technika ke stanovení půdní vlhkosti využívaná především v laboratoři. Půdní vlhkost je stanovena na základě tlaku plynu vzniklého během chemické reakce kalcium karbidu s půdní vlhkostí. Reakce produkuje acetylenový plyn. Množství vzniklého plynu je lineárně závislé na obsahu půdní vlhkosti v půdě. Měření probíhá v tlakové komoře, kde se měří tlak vzniklého plynu. Poté se výsledek normuje vzhledem k hmotnosti vzorku půdy [16].

Moderní metody pro měření půdní vlhkosti jsou především metody nedestruktivní. Využívají elektrických vlastností půdy (dielektrické konstanty, impedanci, kapacity a půdní rezistivity), infračerveného IR záření, optické techniky a radioaktivní techniky jako je neutronový rozptyl nebo útlum gama záření [16].

Komerčně dostupné sensory viz příloha A. používají dvou základních metod pro stanovení půdní vlhkosti. Metody jsou založeny na dielektrických vlastnostech půdy, které se mění s půdní vlhkostí. První technika měření je FDR (frequency domain

reflectometry) frekvenční analýza měřicího signálu. Druhý typ je TDF (time domain reflectometry), časová analýza signálu [14][16].

2.2.3 Konstrukce půdních sensorů.

Každý půdní sensor obsahuje nejméně elektrody viz Obrázek 7. Mezi těmito elektrodami se provádí měření parametrů půdy. Při použití měřících technik TDR a FDR je jedna z elektrod použita jako zdroj elektromagnetického EM pole. Druhá elektroda plní následně funkci přijímací elektrody. Do přijímací elektrody se dostává EM pole, které je ovlivněno parametry měřené půdy, především permitivitou. V přijímací elektrodě se EM pole mění pomocí EM indukce zpět na elektrický signál. Elektrický signál je následně zpracován. Metoda zpracování signálu závisí na technice měření tedy TDR nebo FDR.



Obrázek 7 Půdní sensor (převzato z [15])

Jak je již zmíněno na trhu se kromě profesionálních půdních sensorů dají pořídit i různé polotovary. Konstrukce u polotovarů je principiálně totožná s profesionálními řešeními. Systém rovněž obsahuje dvě měřící elektrody, avšak rozdíl je v měřícím principu. U těchto systému se využívá měření založené na půdní rezistivitě.

2.2.4 Měření typu TDR

Měření funguje na principu zpomalení rychlosti šíření v elektromagnetických EM vln v důsledku průchodu měřenou půdou. Ke zpomalení rychlosti šíření v EM vln dochází vlivem relativní permitivity ϵ_r půdy, která je vždy větší než 1. Rychlost EM vln je definována následovně:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}}$$

kde ϵ je permitivita a μ je permeabilita daného prostředí v němž se EM vlny šíří.

Pro měření jsou používány velmi krátké elektrické pulsy produkující následně EM vlny v měřeném vzorku půdy. Z doby potřebné k průchodu EM pulsu půdou a délky kovové sondy se vyhodnocují parametry půdy [14].

Rychlost pulsu je proměnná s půdní vlhkostí, kvůli relativně vysoké hodnotě relativní permitivity vody ϵ_r . U vody je $\epsilon_r = 80$. Rychlost pulsu v sondě je měřena, vyhodnocena a následně jsou údaje převedeny na půdní vlhkost. Nižší rychlost šíření EM vln znamená zvýšenou půdní vlhkost. TDR patří mezi nedestruktivní techniky měření. Technika umožňuje spolehlivé měření půdní vlhkosti během krátké doby řádově se jedná o desítky sekund. Není třeba používat specifické kalibrace pro různé typy půd. Přesnost měření dosahuje ± 1 % a technika umožňuje spojité měření. Délka měřících elektrod sondy má vliv na přesnost měření. Měření je náchylné na vzduchové mezery v půdě, které mohou výsledky významným způsobem zkreslit. Je třeba počítat se zvýšenou chybou při měření porézních typů půd. Rovněž měření ve vysoce slaných půdách není příliš přesné a zanáší nepřesnost měření až do 5 % [13][14].

2.2.5 Měření typu FDR

Je podobné TDR, měření je rovněž založené na měření permitivity půdy. FDR zajišťuje získání půdní vlhkosti na základně změny frekvence měřícího signálu díky dielektrickým vlastnostem půdy [14].

FDR používá rozmnítání měřené frekvence přes celý měřicí pracovní rozsah. Pro získání přesných výsledků jsou nutné frekvenční kalibrace, které závisí na typu měřené půdy (písečná, jílovitá atd.). FDR patří mezi nedestruktivní techniky měření. Rychlost měření je instantní, výsledky jsou k dispozici ihned s již definovanou přesností měření. Přesnost FDR dosahuje ± 3 %. Rovněž je stejně jako TDR přesnost měření závislá na vzduchových mezerách v půdě. Pořizovací cena je oproti TDR nižší [16].

2.2.6 Měření založené na půdní rezistivitě

Při zvyšování půdní vlhkosti dochází ke snížení rezistivity půdy. Velikost rezistivity může být měřena buď mezi měřícími elektrodami v půdě nebo v materiálu, který je v rovnováze s půdou [16].

Jedna ze základních metod pro stanovení půdní vlhkosti je aplikace porézních bloků. Porézní blok je útvar z porézního materiálu, ve kterém se nacházejí měřící elektrody. Porézní blok je tvořen z materiálů jako jsou sádra, lamináty, keramika či nylon. Jakmile je zařízení vloženo do půdy, půdní vlhkost přechází z nebo do porézního bloku a tím se vlhkosti půdy i porézního bloku vyrovnají. Elektrický odpor je měřen mezi dvěma elektrodami v porézním bloku. Převodní charakteristiky mezi elektrickým odporem a půdní vlhkostí musí být vytvořeny pro každý typ půdy. Použití porézních bloků nabízí výhody nízké ceny a možnost měřit stejnou lokaci po dobu celou sezóny. Sádrové bloky je vhodné obalit textilií. Hlavní nevýhoda je v potřebě individuálních kalibrací pro každý typ půdy a nemožnost pracovat ve vysoce slaných půdách. Dále odezva měření je velká z důvodů vyrovnávání vlhkostí. Dosahuje jednotek hodin [16].

Dále je možnost použít již zmíněné polotovary půdních sensorů. Měření funguje stejně jako u porézních bloků. Avšak zde jsou měřící elektrody umístěny přímo v měřené půdě. Nevýhoda oproti porézním blokům je, že v půdě se nacházejí i ostatní látky, které ovlivňují odpor půdy. Do porézních bloků se dostává pouze vlhkost. Kdežto když jsou elektrody umístěny přímo v půdě je výsledný odpor více ovlivňován vlastnostmi a složením půdy. Dochází zde tedy k většímu rozptylu a chybě než při použití porézních bloků. Další problém nastává, jakmile bude k měření rezistivity použito pouze jedné polarity napětí na měřících elektrodách. Neboť půda obsahuje elektricky polarizované částice, které se během měření v závislosti na polaritě přemisťují od nebo k měřícím

elektrodám. Tím se v blízkosti elektrod vytvoří oblasti s nábojem, které opět zkreslují výsledný měřený odpor [16].

Tyto metody patří mezi nejméně přesné pro stanovení půdní vlhkosti. Se svojí přesností řádově horší než TDR a FDR. Jejich nespornou výhodou je pořizovací cena a jednoduchá implementace.

2.3 Sensor CO₂

Jeden z důležitých parametrů pro biologické procesy, respektive fotosyntézu a růst rostlin je obsah oxidu uhličitého CO₂ ve vzduchu. Oxid uhličitý je nezbytnou složkou pro fotosyntézu. Obvyklý obsah CO₂ ve vzduchu je 340 ppm tedy 0.03 %. Pokud obsah CO₂ klesá zpomaluje se růst rostlin a při hranici 100 ppm se může úplně zastavit. Naopak při zvyšování hladiny CO₂ se může růst naopak zrychlit. Samozřejmě záleží na konkrétním typu rostlin [8].

2.3.1 Princip měření

Využívá principu NDIR nedisperzní metoda průchodu infračerveného IR světla. Molekuly plynu CO₂ interagují s infračerveným IR světlem, to způsobí ohýbání, absorpci a rozpínání svazku IR světla. Množství IR světla absorbovaného je úměrné koncentraci CO₂ [7].

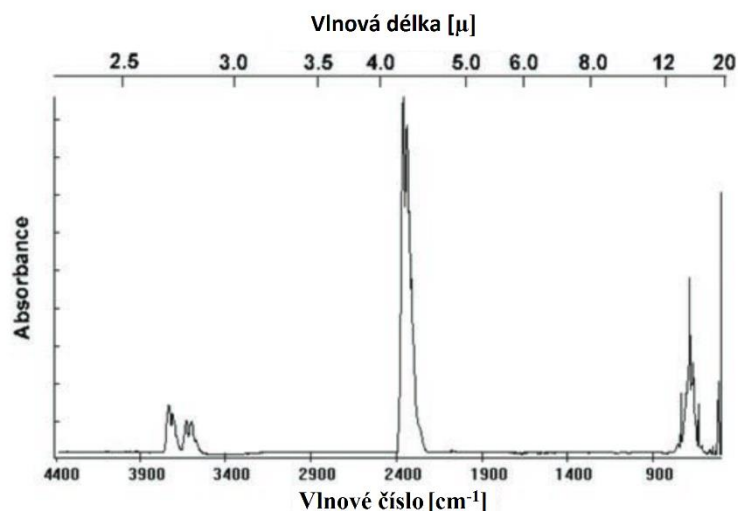
CO₂ silně absorbuje světlo s vlnovou délkou 4.26 μm viz Obrázek 8. CO₂ absorpční pásmo je unikátní a lehce detekovatelné. Absorpce IR světla je v plynech lineární v závislosti na koncentraci CO₂ a řídí se Lambert-Beer zákonem:

$$A = \epsilon lc$$

$$I = I_0 10^{-A}$$

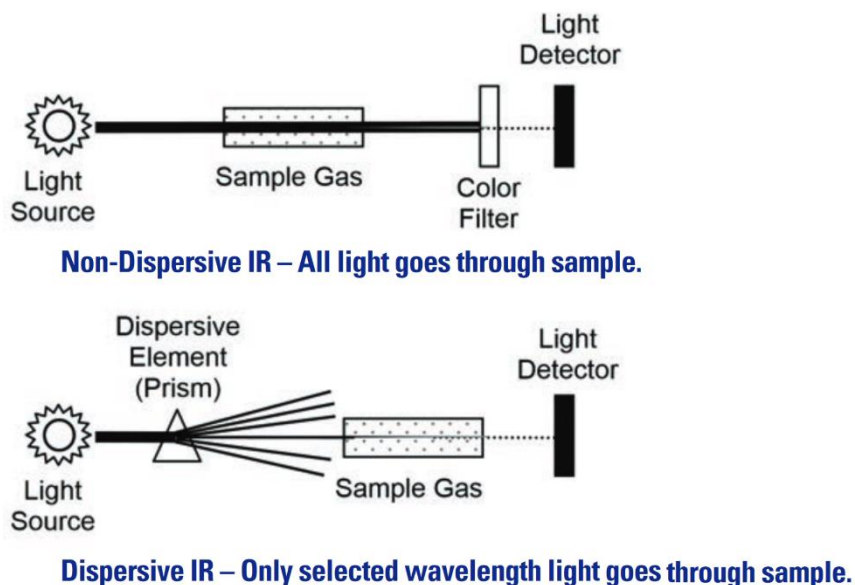
Rovnice 1 Lambert-Beer zákon

kde I_0 je přítomná světelná intenzita emitovaná ze zdroje světla, I je intenzita měřená na fotocitlivém IR detektoru, A je absorbance vztažená k délce, ϵ je molární extrinziční koeficient koncentrace vztažený k délce, l je délka komory měřícího senzoru, respektive vzdálenost od světelného zdroje k detektoru. Jelikož ϵ a l jsou konstanty postačí k měření koncentrace CO₂ sledovat intenzitu světla před a po průchodu měřeným plynem.



Obrázek 8 Absorbance CO₂ (převzato z [7])

Kromě nedisperzní metody existuje také disperzní metoda viz Obrázek 8. Termín nedisperzní poukazuje na fakt, že procházející světlo skrz plyn je filtrováno až za měřeným plynem, bezprostředně před IR detektorem. Disperzní IR detektory používají oproti tomu filtraci světla pro výběr konkrétní vlnové délky ještě před vstupem do měřeného plynu. Pro tento účel lze s výhodou využít optický hranol. Avšak disperzní detektory bývají objemnější, těžší a více komplikované. S tím souvisí i vyšší cena a horší vlastnosti pro přenosná zařízení [7].



Obrázek 9 Nedisperzní IR vs. disperzní IR (převzato z [7])

2.3.2 Blížeší popis vybraného sensoru

Vybraný sensor pro účely MFS je MSH-p/co2/5/v/p [6]. Sensor pracuje na principu NDIR. Sensor snímá přítomnost CO₂ v atmosféře. Sensor obsahuje wolframové vlákno s dlouhou životností, které slouží jako zdroj infračerveného světla. Optická dutina v,

které se nachází měřená atmosféra je spojena s okolím prostřednictvím horního děrovaného krytu sensoru. Z toho důvodu nesmí sensor pracovat v prostředí se 100 % okolní vlhkostí, neboť by hrozilo zavodnění měřicí komory. Dvojí teplotní kompenzace pyroelektrického infračerveného detektoru zajišťuje nezávislost na okolní teplotě. Integrovaný polovodičový sensor a elektronika slouží získání signálu z pyroelektrického detektoru a realizaci komunikace s obslužnou elektronikou. V našem případě s řídicím MCU.

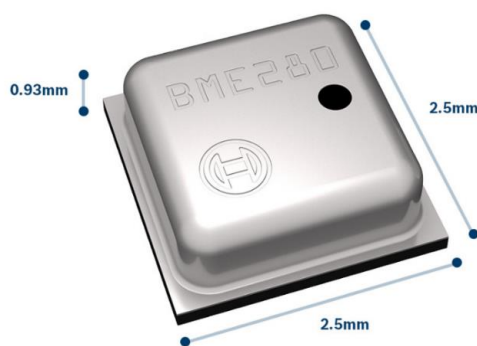
2.3.3 Parametry vybraného sensoru

Sensor pracuje v rozsahu napájecího napětí 3.0–5.0 V. Během provozu spotřebovává 75–85 mA. Pro čtení výstupních hodnot lze použít teplotně kompenzovaný analogový výstup nebo digitální rozhraní UART ve formátu 8 datových bitů 1 stop bit a bez parity při standardní rychlosti 9600 Bd. Sensor umožňuje pracovat na několika měřících rozsazích v závislosti na obsahu CO₂ ve vzduchu. Přesnost sensoru dosahuje 1 % na daném měřícím rozsahu. Pro správnou funkci sensoru je potřeba nechat sensor chvíli pracovat minimálně 1 min z důvodu dosažení pracovních teplot zejména s ohledem na wolframové vlákno, které je zdrojem IR světla. Data lze ze sensoru přes UART vyčítat každých 30 sekund [6].

2.4 Měření parametrů vzduchu

Mezi měřené parametry vzduchu patří teplota, vlhkost a atmosférický tlak. Pro tento účel slouží sensor BME280 [2][3].

BME280 je integrovaný enviromentální sensor vyvinutý pro mobilní aplikace, kde je požadovaný důraz na nízkou spotřebu a malý rozměr sensoru. Sensor kombinuje vysokou linearitu a přesnost pro dané typy měření. Sensor je vyráběn v kovovém pouzdře LGA, které zajišťuje dlouhou stabilitu měřených parametrů a zvyšuje odolnost proti EMC rušení.



Obrázek 10 Sensor BME280 (převzato z [2])

Sensor umožňuje pracovat ve třech výkonových módech což lze s výhodou použít na omezení spotřeby energie.

Základní parametry sensoru jsou následující [3]:

- Pracovní rozsahy měření -40...+85 °C teplota, 0...100 % relativní vlhkost, 300...1100 hPa atmosférický tlak
- Přesnost měření relativní vlhkosti ± 3 %
- Přesnost měření atmosférického tlaku 0.2 Pa (ekvivalentní 1.7 cm)

2.5 Měření teploty

Pro měření teploty jako samostatné veličiny se využívají platinové teplotní sensory PT100, PT1000. Jako další varianta přichází v úvahu měření pomocí termočlánků nebo digitálních sensorů. Platinový sensor má výhodu v nižší ceně a jednodušší implementaci do systému.

2.5.1 Platinové sensory teploty

Princip sensorů je založen na změně elektrického odporu kovů vlivem teploty. Elektrický odpor roste se zvyšující se teplotou. Tento jev lze objasnit skrz krystalografickou strukturou kovových materiálů.

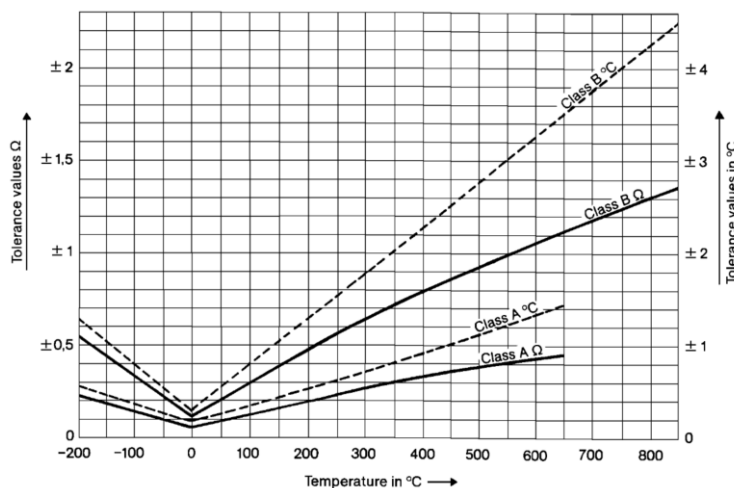
Sensory lze rozdělit do dvou kategorií podle jejich odchylky. Každá kategorie dovozuje jinou hodnotu odchylky. [22]

Kategorie A:

$$Tolerance = \pm(0.12 + 0.002 \times T)$$

Kategorie B:

$$Tolerance = \pm(0.3 + 0.005 \times T)$$



Obrázek 11 Rozdělení platinových sensorů dle tolerance (převzato z [22])

Toto dělení na kategorie je dáno normou DIN IEC 751. To velmi zjednodušuje výběr samotných platinových sensorů. Nemusíme rozlišovat jednotlivé výrobce, ale pouze sledujeme, do jaké kategorie sensor spadá.

3 KOMUNIKAČNÍ ROZHRAŇÍ

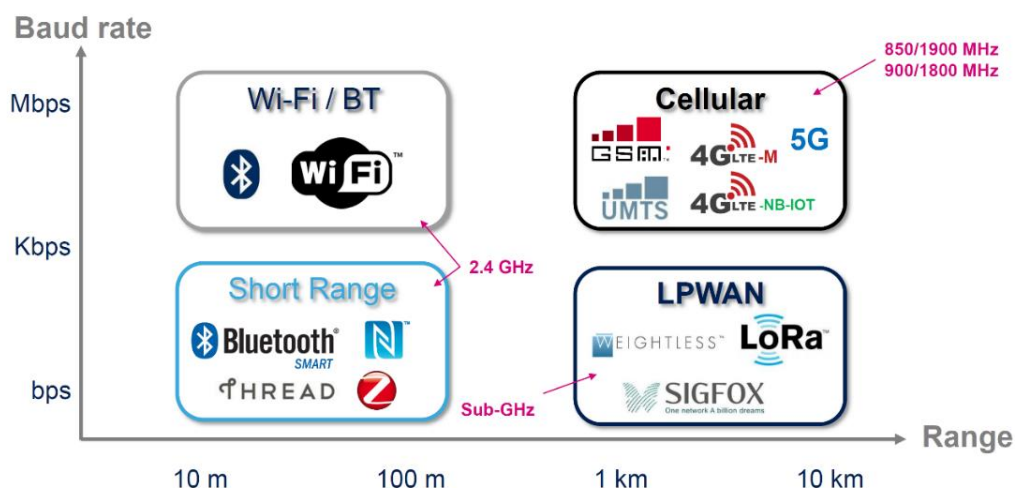
Získaná data ze všech sensorů se prostřednictvím bezdrátového komunikačního rozhraní přeposílají na cloudové uložení případně do uživatelské aplikace, která je dále zpracovává.

3.1 Požadavky na komunikaci

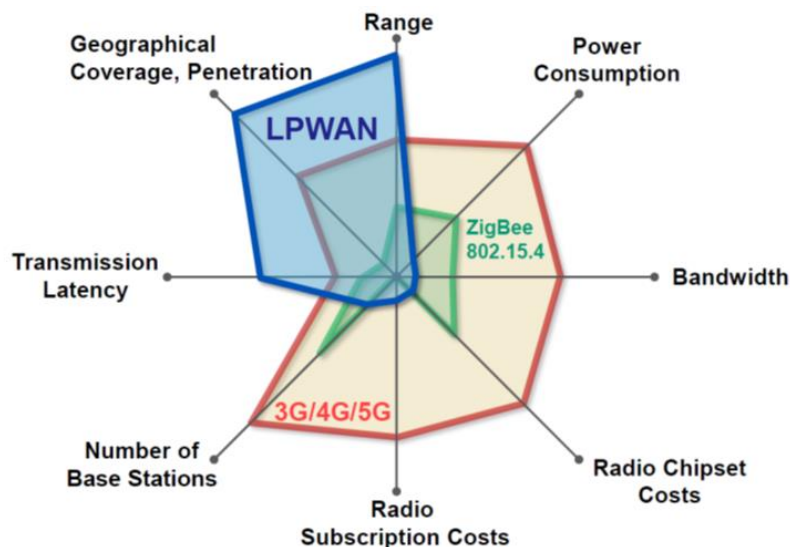
Hlavní požadavky na komunikaci jsou nízká spotřeba energie a nízká pořizovací cena. Dosah komunikace závisí na konkrétní aplikaci multifunkčního sensoru. Standardní dosah v řádu desítek metrů postačuje. Jakmile je multifunkční sensor sloužit například jako meteostanice v terénu je třeba dosah větší. Množství přenášených dat nedosahuje velkých objemů. Přenosová rychlost komunikace v hodnotách jednotek až desítek KB za sekundu bude dostatečná.

3.2 Dostupné bezdrátové komunikační technologie

Na trhu je množství technologií, které jsou schopny pokrýt potřebu multifunkčního sensoru. Technologie se liší pořizovací cenou koncového komunikačního modulu, spotřebou energie potřebnou na přenesení určitého objemu dat, maximální přenosovou rychlostí, dosahem signálu a aktuálním geografickým pokrytím viz Obrázek 13, Obrázek 12.



Obrázek 12 Srovnání bezdrátových komunikačních technologií (převzato z [4])



Obrázek 13 Srovnání bezdrátových komunikačních technologií (převzato z [23])

Vzhledem k požadavkům na komunikaci pro multifunkční sensor nejvíce vyhovují technologie spadající do kategorie LPWAN.

3.3 LPWAN

Je soubor bezdrátových komunikačních technologií, které jsou určeny pro zařízení vyžadující nízkou spotřebu energie, nízkou pořizovací cenu a velký komunikační dosah. U technologií se nepředpokládá velký objem přenášených dat. Není zde nutnost reagovat na obdržená data bez prodlení, komunikace může mít větší latenci [23].

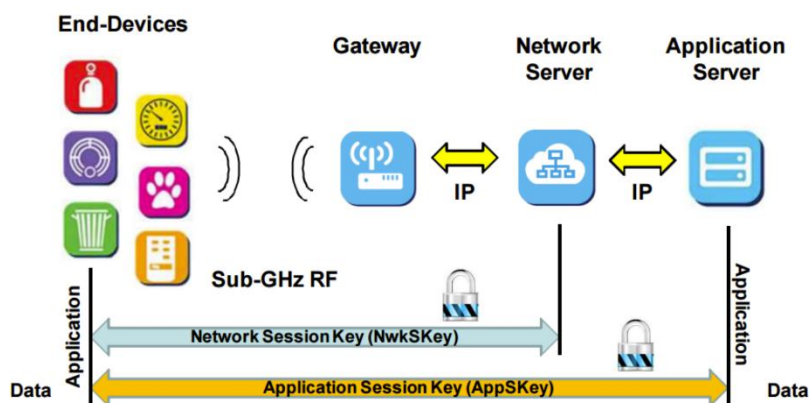
LPWAN pracují v bezlicenčních sub-GHz pásmech, tedy do frekvence 1 GHz. Konkrétní frekvence závisejí na geologické lokaci a jsou definovány mezinárodními normami vydávanými mezinárodní telekomunikační unií ITU. ITU definuje i další parametry jako je maximální vyzařovaný výkon vysílače v daném pásmu, služby, které je možno v daném pásmu využívat a další [25]. V rámci evropských standardů se o rádiové vysílání do frekvencí 1 GHz stará regulační norma ETSI 300-220 [29].

Výhoda sub-GHz pásem je v lepších vlastnostech šíření elektromagnetických EM vln. S tím souvisí i větší dosah technologií. U sub-GHz pásem dochází k menšímu útlumu EM vln vlivem šíření v porovnání s technologiemi jako jsou Bluetooth®, Wi-Fi, které pracují na frekvenci 2.4 GHz. Rovněž prostupnost sub-GHz EM vln v zástavbách je lepší. Neuplatňují se zde tolik útlumy vlivem vícecestného šíření, útlumy průchodem bariérou, lom na rozhraní budov atd. [24].

Mezi LPWAN patří několik komunikačních technologií. Mezi hlavní představitele patří LoRa®, Sigfox. Tyto technologie vznikly pro potřeby komunikace IoT (internet věcí) a komunikace M2M (komunikace mezi stroji). Dále existují výrobci, kteří také využívají výhod sub-GHz pásem. Jejich technologie jsou velice podobné standardům LoRa® či Sigfox. Konkrétně se jedná o výrobce DIGI® jež nabízí hotové komunikační RF moduly. Určitě se v nejbližší době bude na trhu vyskytovat mnoho dalších technologií od různých výrobců specializujících se na IoT a M2M.

3.4 LoRa®

LoRa® či LoRaWAN je bezdrátová komunikační technologie spadající do kategorie PLWAN. LoRaWAN síťová architektura je typicky koncipovaná jako hvězdicová architektura ve které je centrálním prvkem tzv. gateway neboli brána viz Obrázek 14. Brána je transparentní a komunikuje mezi koncovými zařízeními a centrálním serverem. Brány jsou propojeny se serverem skrz standartní IP spojení. Koncové zařízení používají single-hop bezdrátovou komunikaci do jedné či více bran [26].



Obrázek 14 Architektura LoRaWAN

Komunikace mezi koncovými zařízeními a bránou probíhá v několika frekvenčních kanálech s různými datovými rychlostmi. Datová rychlost je vždy kompromis mezi komunikačním dosahem a množstvím přenášených dat. LoRaWAN používá modulaci typu Spread-Spectrum SS neboli rozmítání spektra. Výhoda této modulace je omezení interferencí mezi jednotlivými datovými přenosy. Rovněž se tak vytváří množství virtuálních přenosových kanálů a rapidně zvyšuje přenosová kapacita. LoRaWAN nabízí přenosové rychlosti od 0.3 kbps do 50 kbps. LoRaWAN síťový server řídí datový tok a rádio frekvenční RF výstupní vysílací výkon pro každé koncové zařízení individuálně. Tato technika se nazývá ADR adaptivní přenosová rychlost [26].

LoRaWAN jako součást kritické infrastruktury, důvěrných osobních dat či kritických funkcí pro společnost má potřebu pro zabezpečení informací. To je řešeno několika specifickými klíči a kódováním v několika vrstvách [26].

- Unikátní síťový klíč (NwkSKey) zajišťuje bezpečnost na síťové vrstvě
- Unikátní aplikační klíč (AppSKey) zajišťuje bezpečnost na aplikační vrstvě
- Specifický klíč zařízení (DEVEUI)

Infrastruktura LoRaWAN je aktuálně ve výstavbě. Budoucí pokrytí počítá s většinou vyspělých států. V několika Evropských zemích je již pokrytí značné a bude se dále rozvíjet. Infrastrukturu budují zpravidla mobilní operátoři v daných zemích. V ČR je infrastruktura budována českými radiotelekomunikacemi [28]. Poplatky za využívání LoRaWAN služeb se platí daným poskytovatelům. Poplatky jsou placeny formou tarifu. Cena se odvíjí od množství přenášených dat a počtu zařízení připojených do LoRaWAN.

3.5 DIGI®

Digi International Inc. je společnost specializující se na výrobu a vývoj RF komunikačních modulů, gateway (bran), celulárních (buňkových) a routerů, které souží k vytváření komunikační infrastruktury [30]. V portfoliu společnosti jsou pro potřebu multifunkčního sensorů MFS zajímavé především RF komunikační moduly.

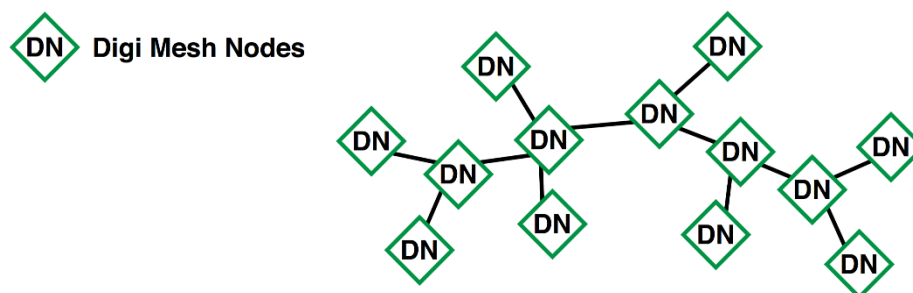
Sortiment RF komunikačních modulů obsahuje poměrně velký výběr komunikačních protokolů od Wi-Fi, ZigBee, Bluetooth až po protokoly vyvíjené společností, které se nazývají Mesh, DigiMesh, Point-to-Point a Point-to-Multipoint.

Ze požadavků na komunikaci MFS vycházejí z nabízeného sortimentu nejlépe RF komunikační moduly pracující na protokolu DigiMesh.

3.5.1 Protokol DigiMesh

Je vyvíjen společností Digi International Inc. Protokol vychází z protokolu ZigBee, a především pak ze standardu IEEE 802.15.4 [32]. DigiMesh je proprietární bezdrátová buňková síťová technologie. Obrázek 15. Síť je homogenní – má pouze jeden typ buněk (zařízení). Není zde potřeba komplexní architektury sítě pro definování odlišných buněk v síti jako jsou koncové body, routery, brány atd. Všechny body mohou být nastaveny jako nízko výkonové napájené z baterií. DigiMesh nabízí výhody jako jednoduchost sítě a flexibilitu pro rozšiřování sítě a možnost pracovat i v oblastech bez pokrytí signálu poskytovanými standartními mobilními providery [37].

Rozšiřování sítě neboli zvýšení dosahu je dosaženo díky možnosti datových paketů procházet jednotlivými buňkami sítě. Zároveň je tu možnost vytvářet alternativní cesty v případě výpadku některé buňky sítě. Tím se síť přirozeně obnovuje [37].



Obrázek 15 Architektura buňkové síťové technologie DigiMesh (převzato z [37])

DigiMesh se jeví jako vlastní uzavřená síť ze, které data neodcházejí. Data jsou přeposílány pouze v rámci buněk sítě. V případě vytvoření takovéto sítě je třeba aby všechny aplikace, které tuto síť využívají byly naprosto autonomní v rámci sítě. Tedy celý systém aplikací využívající tuto síť musí vystačit s daty, které se vyskytují pouze v této uzavřené síti. V případě, že by bylo třeba komunikovat z nebo do uzavřené sítě DigiMesh z externích aplikací mimo tuto síť je třeba nějakým způsobem vytvořit přístupový bod, bránu do sítě DigiMesh. To lze zajistit tak že jedno, či více zařízení využívající síť DigiMesh bude kromě této technologie disponovat i odlišnou komunikační technologií např. standartním IP připojením.

3.5.2 Protokol Point-to-point

Point-to-point protokol PPP je nejjednodušší cesta pro realizaci komunikace. Komunikace probíhá mezi dvěma body (bunčkami). Příklad takovéto komunikace je telefonní hovor, kde jsou telefony spojeny navzájem, a to co říká volající je slyšeno pouze přijímací straně [30].

3.5.3 Protokol Point-to-multipoint

Point-to-point protokol PPP pracuje dobře, když jsou použity pouze dvě zařízení. Jakmile počet zařízení roste PPP se stává nepoužitelným. Použitím point-to-multipoint protokolu PMP protokolu lze komunikovat s větším počtem zařízení. Komunikace obvykle zahrnuje centrální řídicí bod tzv. bránu a několik koncových zařízení (buněk) připojených k bráně. Protokol point-to-multipoint se v síťové terminologii označuje jako hvězdicová architektura [30].

3.5.4 XBee® 868LP

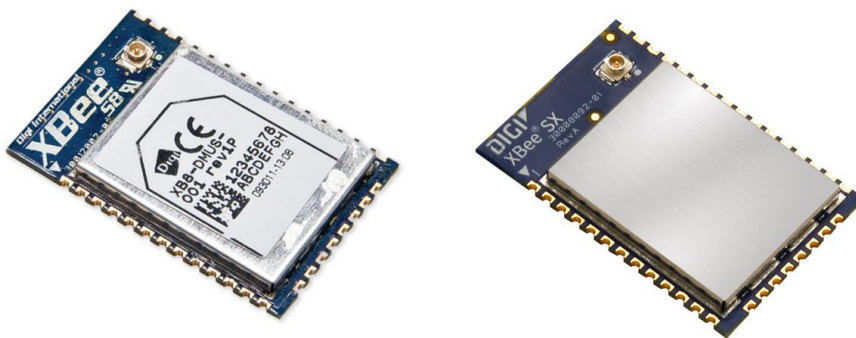
Je RF modul Obrázek 16 navrhnutý pro zajištění vysokého výkonu a nízké spotřeby. Modul je určen pro komunikaci v sítích užívající protokoly DigiMesh a Point-to-Multipoint. Modul pracuje na frekvencích 863-870 MHz a je určen pro použití v Evropě viz norma ETSI [29]. Maximální přenosová rychlost modulu je 50 kbps [32].

XBee® 868LP je rovněž první modul používající technologie Listen Before Talk LBT a Adaptive Frequency Agility AFA. AFA je technika, která zamezuje začít vysílat v daném radiovém kanálu v případě, že je tento kanál již obsazen. Radiový vysílač periodicky monitoruje radiové kanály a zaznamenává, které kanály jsou obsazeny. Na základě těchto informací vysílač vybere radiový kanál, který se právě neužívá a tím zamezí případné interferenci signálu. Technologie LBT nejprve naslouchá v daném frekvenčním pásmu, po vyhodnocení frekvenčního pásma určí nejvhodnější čas na odeslání vlastních dat. LBT rovněž snižuje pravděpodobnost interference vysílaného signálu s okolním RF signálem [32].

Modul se dodává ve více provedeních lišících se v provedení antény (integrovaná na substrátu, U.FL konektor, RF pad), přenosovou rychlostí (80 kbps, 10kbps) a programovatelnou verzí. Pro potřeby multifunkčního sensoru bude nejvhodnější varianta s U.FL konektorem a přenosovou rychlostí 10 kbps [32].

3.5.5 XBee® SX

Modul je pinově kompatibilní s modulem XBee® 868LP. Rovněž využívá protokoly DigiMesh a Point-to-Multipoint. Rozdíl oproti XBee® 868LP je v pracovní frekvenci, která je 902-928 MHz a předurčuje použití modulu v Severní Americe. Rozdíl mezi Evropskou a Americkou normou je v radiovém spektru. Rozdíl je v počtu využitelných radiových kanálů, jejich šířce a maximálním povoleným vysílacím výkonem v daném radiovém kanálu. V Severní Americe je maximální dovolený vysílací výkon vyšší než v Evropě. Modul rovněž používá technologie LBT a AFA [33].

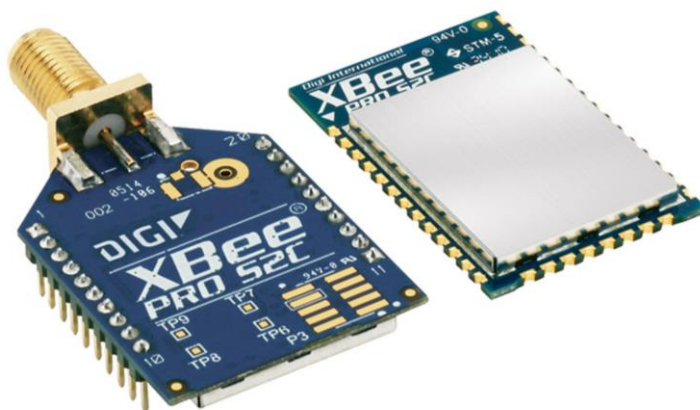


Obrázek 16 RF moduly vlevo XBee® 868LP, vpravo XBee® SX (převzato z [30])

3.5.6 XBee® S2C DigiMesh® 2.4

Je RF modul pracující na frekvenci 2.4 GHz. Modul využívá inovativní DigiMesh protokol. Modulační technika je DSSS. DSSS je definována i v rámci standardů IEEE 802.15.4. Další parametry modulu jsou shrnuty v Tabulce 2.[34]

Modul se dodává ve v provedení SMT určený pro povrchovou montáž, obdobně jako XBee® 868LP či XBee® SX. Dále pak v provedení s pin-headry viz Obrázek 17. Toto provedení je určeno pro montáž do patice. Modul je nabízen s integrovanou anténou na substrátu, U.FL konektorem a RF pade. Multifunkčního sensor používá variantu s pin-headry a U.FL konektorem.



Obrázek 17 RF moduly Xbee® S2C DigiMesh® 2.4 rozdílná provedení

3.5.7 Porovnání parametrů Xbee® Modulů

V následující tabulce jsou shrnuty základní parametry RF modulů, které jsou zvoleny jako primární komunikační rozhraní. Moduly XBee® 868LP a XBee® SX jsou použity pro případ kdy je požadován vyšší komunikační dosah multifunkčního sensoru. Modul XBee® DigiMesh 2.4 je použit v ostatních případech.

Tabulka 2 Porovnání modulů Xbee

DIGI XBee® Moduly			
Typ modulu	XBee® 868LP	XBee® SX	XBee® DigiMesh 2.4
Frekvenční pásmo	863 MHz – 870 MHz	902 MHz – 928 MHz	2.4 GHz
Přenosová rychlost	10 kbps nebo 80 kbps	10 kbps - 250 kbps	do 250 Kbps
Síťové technologie	DigiMesh®, Repeater, Point-to-point, Peer-to-peer	DigiMesh®, Point-to-point, Point-to-multipoint, Mesh	DigiMesh®
Městský dosah	Do 112 m s 2.1 dBi anténou do 14 m s integrovanou anténou	Do 100 m při 10 Kbps	Do 60m
Venkovní dosah	Do 8.4 km s 2.1 dBi anténou do 0.64 km s integrovanou anténou	Do 14 km při 10 Kbps	Do 60m
Vysílací výkon	Max. 14 dBm (25 mW) E.I.R.P s 2 dBi anténou	Max. 13 dBm	Standardně 5 dBm, Max 8 dBm
Citlivost přijímače	-101 dBm při 80 kbps, -106 dBm při 10 kbps	-113 dBm při 80 kbps, -106 dBm při 110 kbps	-100 dBm
Napájecí napětí	2.7-3.6 VDC	2.4-3.6 VDC	2.1-3.6 VDC
Spotřeba při vysílání	48 mA	55 mA	33 mA
Spotřeba při příjmu	27 mA	40 mA	28mA
Režim spánku	1.7 μ A	2.5 μ A	do 1 μ A
Splněné normy	ETSI (EU)	FCC ID: MCQ-XBSX (US), IC: 1846A-XBSX (CA), RCM (AU)	IEEE 802.15.4
Cena za jeden kus	23\$	35\$	29\$

3.5.8 Anténa použita k RF modulům

Komunikační moduly se budou používat s externí anténou pro dosažení potřebného dosahu. Anténa se připojuje k modulu prostřednictvím konektoru U.FL. Pro každý typ modulu je použita anténa s jinou pracovní frekvencí.

Jedná se o čtvrtvlnné antény s charakteristickou impedancí 50 Ω a maximálním ziskem 1.6 dBi. Antény jsou navrženy jako voděodolné a určeny pro montáž skrz chassis zařízení. Tím se docílí vytvoření vodě odolného krytu okolo citlivé elektroniky [35][36].

4 HARDWARE

4.1 Koncept

Multifunkční sensor je navrhnut s několika základními požadavky na fyzickou realizaci plynoucími ze zadání. Základní kritéria pro fyzickou realizaci:

- Napájení ze solárního panelu
- Napájení z USB portu
- Nízká spotřeba energie

Nízká spotřeba energie je řešena výběrem součástek s nízkou vlastní spotřebou energie. Při volbě napěťových DC/DC měničů je brán ohled na efektivitu konverze. Většina elektronických periférií umožňuje režim spánku, kdy spotřeba energie klesá na minimum, nebo úplně vypnutí.

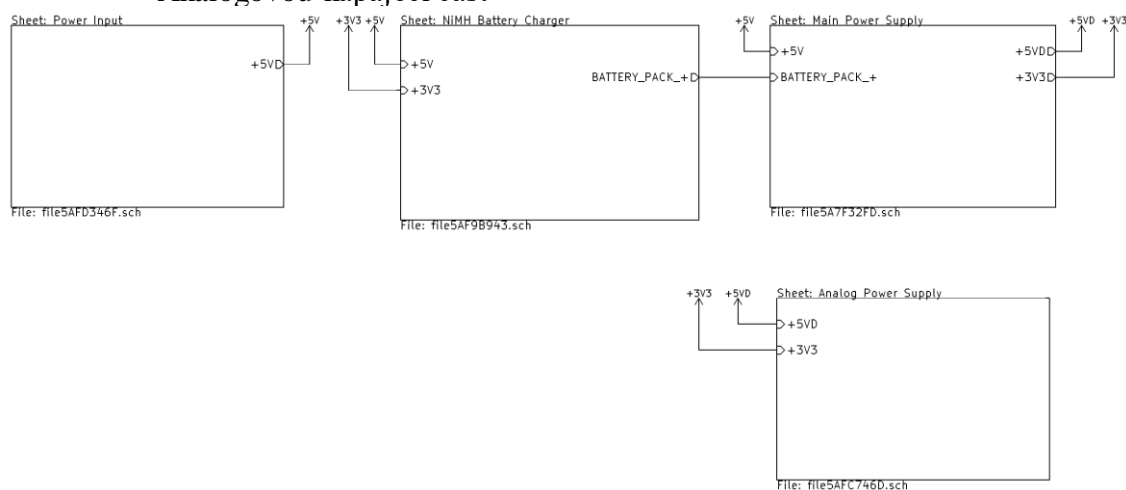
Vstupní periferie multifunkčního sensoru, které komunikují s okolním světem a je na nich možnost vzniku ESD události mají na svém vstupu ochranu proti ESD rušení.

4.2 Blokové schéma

Blokové schéma multifunkčního sensoru se dá rozdělit do dvou základních částí. První část blokového schématu obsahuje napájecí část. Druhá část obsahuje řídicí a měřicí periferie plus komunikační rozhraní multifunkčního sensoru.

Napájecí část se dále dělí na:

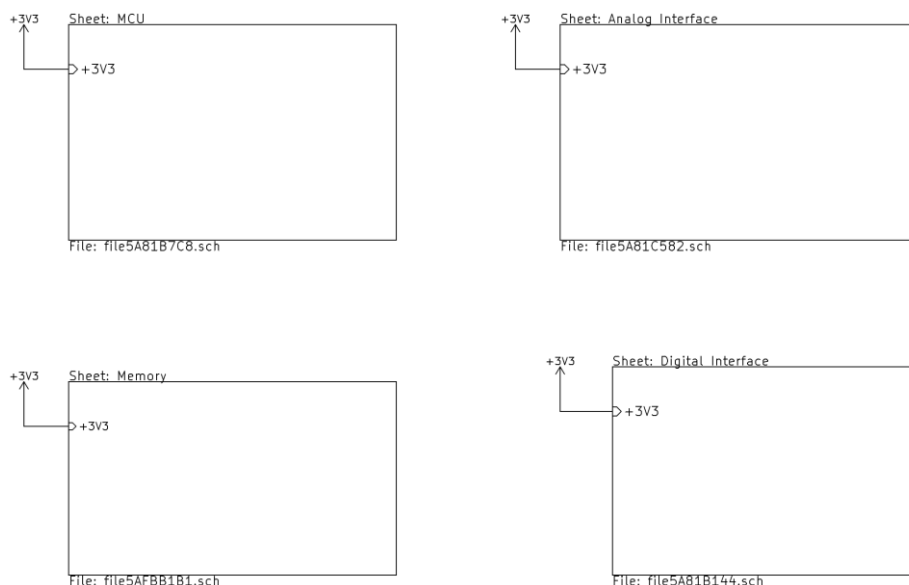
- Vstupní napájecí část
- Nabíječku baterií
- Hlavní napájecí zdroj
- Analogovou napájecí část



Obrázek 18 Napájecí část multifunkčního sensoru

Druhá část blokového schématu obsahuje:

- Mikroprocesor MCU
- Analogové rozhraní
- Digitální rozhraní
- Paměť

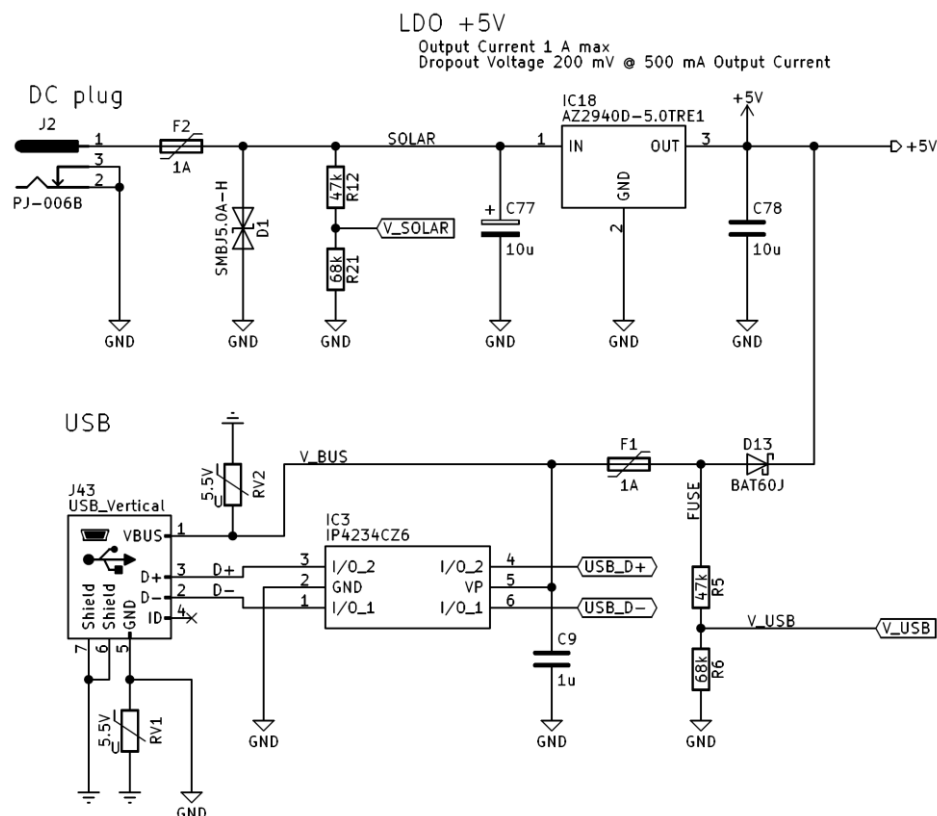


Obrázek 19 Druhá část blokového schématu multifunkčního sensoru

Jednotlivé části blokového schématu jsou podrobněji rozebrány v následujících kapitolách.

4.3 Vstupní napájecí část

Jak plyne ze zadání multifunkční sensor musí být schopen pracovat ze solárního panelu. Solární panel se připojuje prostřednictvím DC konektoru. Další zdroje energie mohou být USB port či externí zdroj zapojený do DC konektoru namísto solárního panelu.

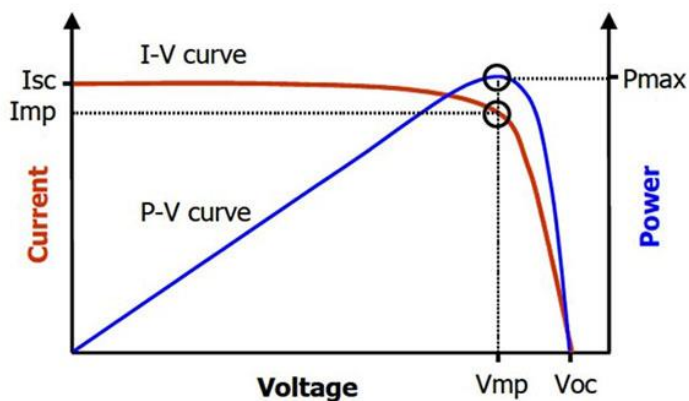


Obrázek 20 vstupní napájecí část

Rozsah vstupního napětí na DC konektoru je 5-12 V. Vstupní proud do 400 mA. To umožňuje napájet sensor, či dobíjet baterie prakticky z libovolného adaptéru či zdroje. V případě připojení solárního panelu je maximální možný výkon dodávaný do sensoru proměnný. Sensor je na tento stav přizpůsoben.

4.3.1 Solární panel

Použitý solární panel pochází od výrobce Sparkfun. Panel má standartní I-V charakteristiku solárních článků. Maximální možný odebíraný výkon z panelu se nachází v bodě P_{max} .



Obrázek 21 I-V obecná charakteristika solárního panelu

Parametry panelu jsou následující.

- Monokrystalický křemík 19 % účinnost
- Napětí naprázdno 7.0 V
- Napětí V_{mp} 6 V
- Proud I_{mp} 378 mA
- Maximální výkon P_{max} 2.27 W
- Voděodolný, UV rezistentní
- Koncovka DC jack

4.3.2 Lineární stabilizátor napětí

Stabilizuje napětí vstupující do multifunkčního senzoru z DC konektoru. Obvody senzoru jsou dimenzovány pro napájení z 5 V. Vstupní rozsah napětí DC konektoru 5-12 V. Proto je nutné napětí upravit. Zvolený lineární stabilizátor napětí LDO je AZ2940D.

Jedná o standardní LDO. Výstupní napětí je fixně nastaveno na 5 V. Důležitý parametr obvodu nízký úbytek napětí mezi vstupem a výstupem LDO. Ten může dosahovat při 500 mA výstupního proudu hodnot menších než 200 mV. Po většinu času je z LDO odebírán proud menší, takže i úbytek může být menší. Nízký úbytek napětí je výhodný, jakmile je napětí na vstupu LDO blízké hodnotě 5 V a je třeba redukovat úbytek napětí na stabilizátoru, aby se maximum energie předalo na výstup.

4.4 Baterie

Slouží k napájení multifunkčního senzoru. Baterie je primárním zdrojem energie pro napájení všech elektrických komponent. Baterie musí být rovněž dobře přístupná a jednoduše nahraditelná.

Výběr typu baterie je brán s ohledem na dostupnost baterií a jejich cenu. Původní myšlenka byla použití Li-ion baterie. Ta vychází nejlépe co se týče hustoty energie na objem baterie. Co se týče dostupnosti nevychází Li-ion baterie nejlépe, zejména pak v porovnání s tužkovými bateriemi. Proto jsou jako primární baterie použity tužkové AA baterie.

4.4.1 Typ Baterie

Jako primární baterie slouží tužkové AA baterie. Tyto baterie se vyrábí ve dvou provedeních nabíjecí a nenabíjecí. Nenabíjecí baterie jsou alkalické články. Nabíjecí baterie jsou Ni-MH baterie. Multifunkční sensor dokáže pracovat jak s alkalickými, tak i Ni-MH bateriemi.

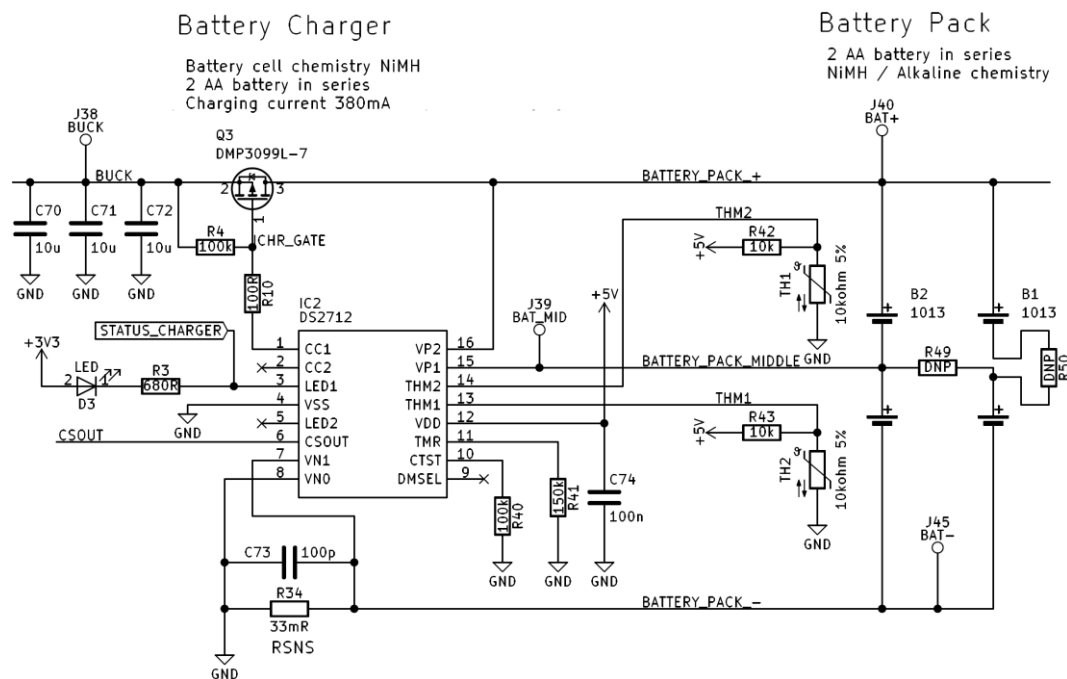
Tabulka 3 Porovnání baterií

Baterie	Velikost	IEC jméno	Nominální napětí	Nabíjecích cyklů	Kapacita
Alkalická	AA	LR6	1.5 V	-	1800-2600 mAh
Ni-MH	AA	HR6	1.2 V	500	600-2850 mAh
Li-ion	18650	-	3.6 V	300	2000-5000 mAh

4.5 Nabíječka baterií

Obsluhuje baterii. Udrží baterii v nabitém stavu. Hlavní požadavky na nabíječku jsou cena, efektivita a možnost používat alkalické tak Ni-MH baterie. Zdroj nabíjecího proudu je řešen jako snižující DC/DC měnič. Tím se docílí snížení vstupního proudu a tepelných ztrát. S ohledem na daná kritéria je jako řídicí obvod nabíječky zvolen DS2744.

Integrovaný obvod DS2744 je ideální řešení pro in-systém nebo samostatný systém nabíjení jedné či dvou Ni-MH baterií. DS2744 monitoruje teplotu, napětí a nabíjecí čas pro zajištění správného průběhu nabíjení. Nabíječka obsahuje řídicí algoritmus pro nabíjení Ni-MH baterií. Součástí algoritmu je i série testů pro odhalení vadných baterií. Algoritmus je schopen detekovat přítomnost alkalických baterií a předejít tak jejich nabíjení.



Obrázek 22 nabíječka baterií

4.5.1 Popis nabíjecího algoritmu

Nabíjecí cyklus začíná těmito událostmi. Přivedením napětí z externího zdroje. V našem případě se jedná o solární panel nebo USB kabel. Vložením baterií do nabíječky. Algoritmus poté začne cyklem rychlého nabíjení.

Algoritmus během fáze rychlého nabíjení zajišťuje otestování baterií pro zajištění nechtěného nabíjení alkalických baterií či vadných Ni-MH baterií. Cyklus rychlého nabíjení pokračuje, dokud napětí baterie naprázdno nepřesáhne hodnotu 1.0 V, nebo teplota baterie nevzroste nad teplotu větší než 50° C. Teplota je měřena prostřednictvím dvojice NTC termistorů. Po překročení napětí naprázdno následuje nabíjení baterie konstantním proudem až do plného nabití baterií. Po dosažení plného nabití je baterie udržována ve stavu plného nabití. Tento stav končí, jakmile je odpojen zdroj napětí nebo je odebrána baterie. Během celého nabíjecího cyklu je sledována teplota, napětí a doba nabíjení.

Parametry nabíječky nabíjecí proud a doba nabíjení jsou nastaveny prostřednictvím příslušných rezistorů. Hodnoty jsou nastaveny následovně:

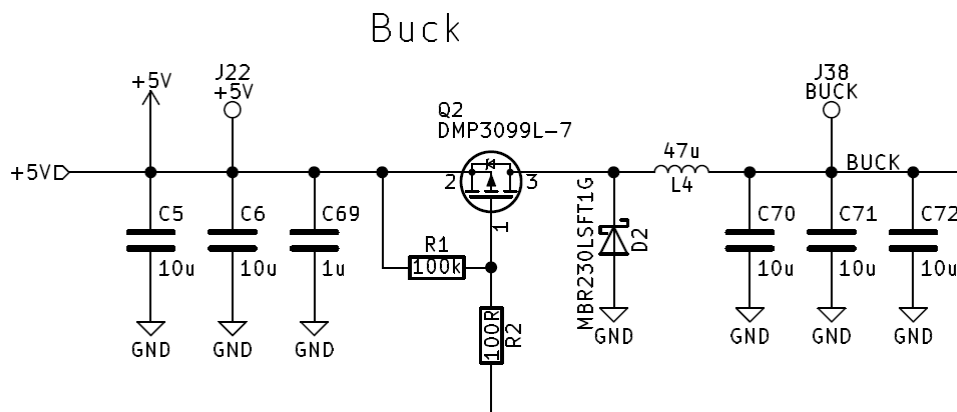
- Doba nabíjení 225 min
- Nabíjecí proud 0.38 A

Další parametr nabíječky je impedanční práh. Ten slouží k rozpoznání typu baterie. Alkalické a Ni-MH baterie se liší vnitřním odporem během nabíjení. Alkalická baterie má patrně větší vnitřní odpor než Ni-MH baterie. Tento znatelný rozdíl vnitřního odporu umožňuje detekovat typ baterie. Impedanční práh je nastaven:

- Impedanční práh 0.21 Ω

4.5.2 Zdroj nabíjecího proudu

Slouží jako zdroj konstantního nabíjecího proudu pro nabíjení baterií. Použitá topologie je snižující DC/DC měnič. Jako zdroj napětí slouží solární panel nebo USB port. Nominální vstupní napětí je 5 V. Výstupní proud a napětí jsou regulovány na základě pokynů nabíječky.



Hodnota vstupního proudu V_{in} do zdroje se sníží vlivem napěťové konverze směrem dolů.

$$I_{in} = \frac{V_{out}}{V_{in}} \times I_{out} \times \frac{1}{\eta} = \frac{2.5}{5} \times 0.38 \times \frac{1}{0.8} = 0.23 \text{ A}$$

Kde V_{in} je vstupní napětí, I_{out} je nabíjecí proud a η je efektivita konverze. Jak je vidět hodnota vstupního proudu I_{in} poklesla na hodnotu 0.23 A.

4.6 Buck-Boost konvertor

Je snižující – zvyšující DC/DC měnič. Měnič je v činnosti po celou dobu životnosti zařízení. Velká pozornost je kladena na co nejnižší vlastní spotřebu energie a co nejvyšší účinnost konverze energie. Především je důležité, aby účinnost konverze byla vyrovnaná v co nejširším rozsahu výstupních proudů. Výstupní proudy jsou závislé na stavu zařízení. Jestliže dojde k aktivaci měření a odesílání dat do sítě je spotřeba zařízení řádově v desítkách mA. Naopak ve stavu nečinnosti výstupní proud dosahuje hodnot jednotek až nízkých desítek μA .

Vstupní napětí měniče se pohybuje od 2.4 V až 5 V v závislosti na tom jaký je dostupný zdroj energie. Tj. ze solárního panelu, USB portu či baterie. Výstupní napětí je 3V3. Je vidět, že vstupní napětí se pohybuje pod i nad nominální hodnotou výstupního

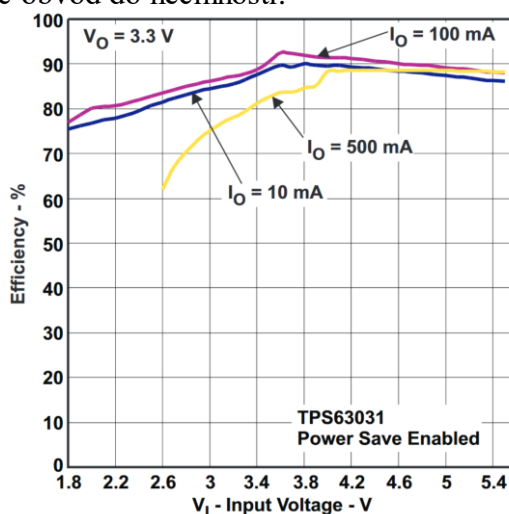
napětí. Z toho důvodu je právě zvolena topologie snižující – zvyšující DC/DC měnič. Zvolený integrovaný obvod pro realizaci měniče je TPS63031.

4.6.1 Popis obvodu

Obvod TPS63031 poskytuje řešení pro produkty napájené z dvou až tří sériově zapojených alkalických, Ni-MH baterií nebo jedné Li-ion baterie. Výstupní proud zdroje je závislý na vstupním zdroji. Může dosahovat až 800 mA při napájení ze zdroje 5 V.

Obvod pracuje s na fixní frekvenci 2.5 MHz. Používá pulzně šířkovou modulaci PWM pro dosažení co nejlepší účinnosti. Při nízkých výstupních proudech obvod přejde do úsporného režimu pro zajištění maximální efektivity přes široký rozsah výstupních proudů. Tento režim je u obvodu povolen. Výstupní napětí je fixně nastaveno na hodnotu 3.3 V.

Střední proud cívku je regulován rychlou napěťovou zpětnou vazbou. Obvod monitoruje vstupní i výstupní napětí pro okamžitou změnu výstupní střídy pro dosažení regulace výstupního napětí a proudu. Obvod snímá střední a maximální hodnotu vstupního proudu. Takto je obvod schopen zajistit bezpečnou pracovní oblast za všech pracovních podmínek. Pro teplotní ochranu obvodu slouží vnitřní teplotní sensor, který v případě přehřátí uvede obvod do nečinnosti.



Obrázek 23 TPS36031 závislost efektivity konverze na výstupním proudu

4.6.2 Výběr komponent

Hlavní důraz je kladen na pracovní cívku a kondenzátory. Vstupní kondenzátor musí být větší než 4.7 μF . Kapacita výstupního kondenzátoru by měla být větší než 10 μF . Větší kapacita znamená nižší zvlnění výstupního napětí a nižší pokles výstupního napětí během proudových špiček výstupního proudu. Hodnota výstupního kondenzátoru, respektive výstupní kapacity je proměnná. Závisí na stavu zařízení. Pohybuje se v rozsahu 70 až 100 μF . Výstupní napětí za těchto podmínek dosahuje nízkého zvlnění.

Pracovní cívka by měla mít nízký stejnosměrný odpor pro minimalizaci vodivostních ztrát. Vlastní rezonanční frekvence cívky musí být dimenzována na poměrně vysokou pracovní frekvenci 2.5 MHz. Saturační proud cívky musí být větší než špičkové hodnoty proudu procházející cívku. Špičkovou hodnotu proudu v cívce I_{peak} spočítáme následovně:

$$I_{peak} = \frac{I_{out}}{\mu \times (1 - D)} + \frac{V_{in} \times D}{2 \times f \times L}$$

Kde V_{in} je vstupní napětí měniče, V_{out} výstupní napětí měniče, D střída, μ efektivita konverze, f pracovní frekvence, L indukčnost [H]. Střidu měniče D vypočteme z hodnot V_{in} a V_{out} následovně:

$$D = \frac{V_{out} - V_{in}}{V_{out}}$$

Pro výpočet I_{peak} je uvažován nejhorší případ. I_{peak} nabývá největších hodnot během nízkého vstupního napětí $V_{in} = 2.4 \text{ V}$. Výstupní proud $I_{out} = 0.5 \text{ A}$, efektivita $\mu = 0.9$, pracovní frekvence $f = 2.5 \text{ MHz}$, indukčnost cívky $L = 2.2 \mu\text{H}$

$$D = \frac{3.3 - 2.4}{3.3} = 0.2727$$

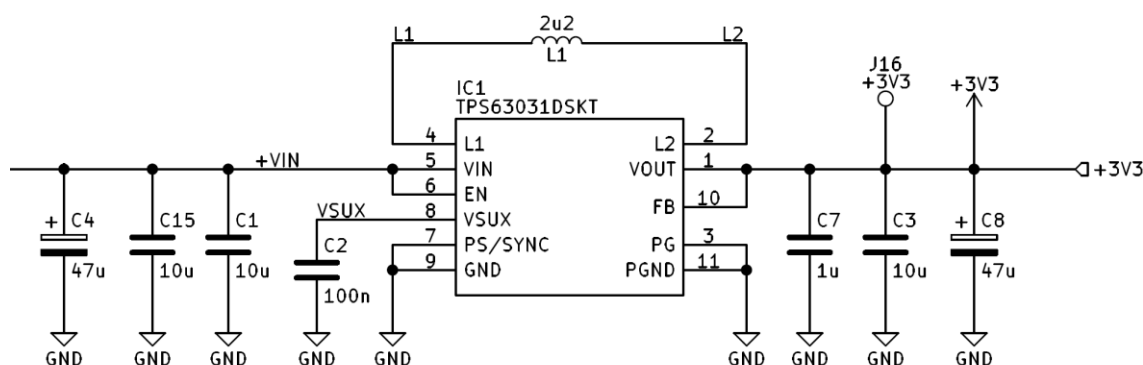
$$I_{peak} = \frac{0.5}{0.9 \times (1 - 0.27)} + \frac{2.4 \times 0.27}{2 \times 2.5 \times 10^6 \times 2.2 \times 10^{-6}} = 0.82 \text{ A}$$

Na základě těchto požadavků je zvolena pracovní cívka s parametry:

- Indukčnost $2.2 \mu\text{H}$
- Saturační proud 2.1 A
- Stejnoseměrný odpor 0.078Ω
- Vlastní rezonanční frekvence 60 MHz

Buck-Boost converter +3V3

$V_{out} = 3.3\text{V}$
 $V_{in} = 2.4\text{V} - 5.5\text{V}$
 Up to 800-mA Output Current at 3.3 V in Step-Down Mode ($V_{in} = 3.6 \text{ V to } 5.5 \text{ V}$)
 Up to 500-mA Output Current at 3.3 V in Boost Mode ($V_{in} > 2.4 \text{ V}$)
 Quiescent current 25 μA typ



Obrázek 24 Buck-Boost konvertor schéma

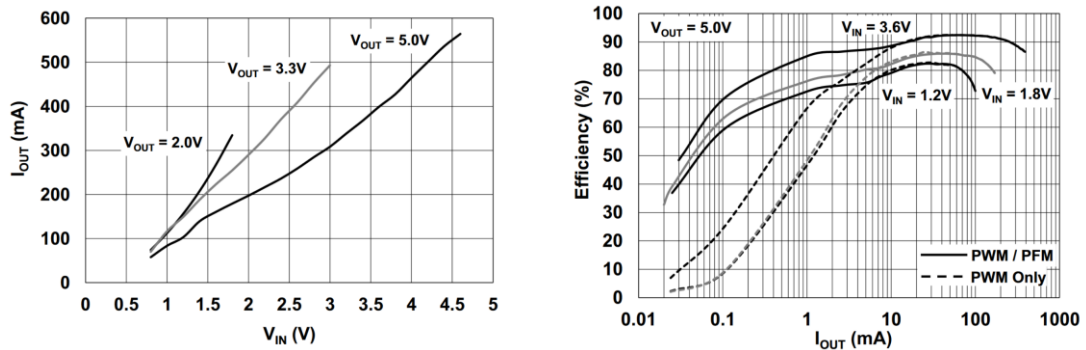
4.7 Boost konvertor

Je zvyšující DC/DC měnič. Měnič slouží k napájení periférií multifunkčního sensoru. Měnič je aktivní pouze je-li vyžadováno měření využívající analogovou část multifunkčního sensoru. Zbývající část času je vypnutý a s ním i analogová část. Požadavky na měnič jsou dobrá efektivita, možnost zapnutí a vypnutí.

Multifunkční sensor z výstupu tohoto měniče bude odebírat maximální proud do 150 mA . Pro realizaci měniče byl zvolen obvod MCP1640.

4.7.1 Popis Obvodu

Obvod MCP1640 je kompaktní, vysoce efektivní měnič s fixní pracovní frekvencí 500 kHz. Zapojení obvodu vychází z doporučeného zapojení výrobce. Vlastní spotřeba měniče je 220 μA . Výstupní napětí V_{out} měniče je 5 V. Maximální výstupní proud I_{out} je limitován velikostí vstupního napětí V_{in} .

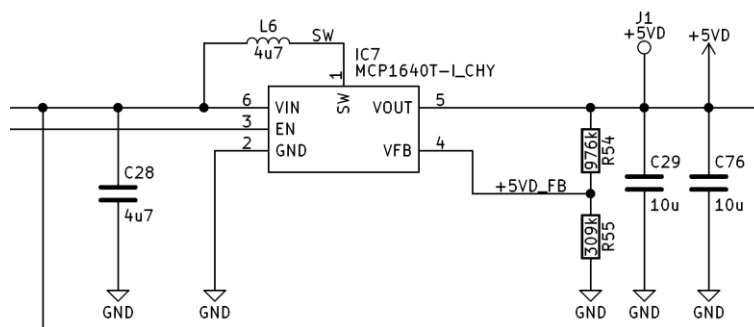


Obrázek 25 MCP1640 grafy

Maximální možný proud odebíraný z měniče se může pohybovat při vstupní napětí $V_{in} = 2.4\text{ V}$ okolo 250 mA. Zvlnění výstupního napětí se pohybuje s ohledem na velikost výstupní kapacity okolo 200 mV_{p-p}. Parametry pracovní cívky jsou navrženy obdobně jako u obvodu TPS63031.

Boost converter +5V

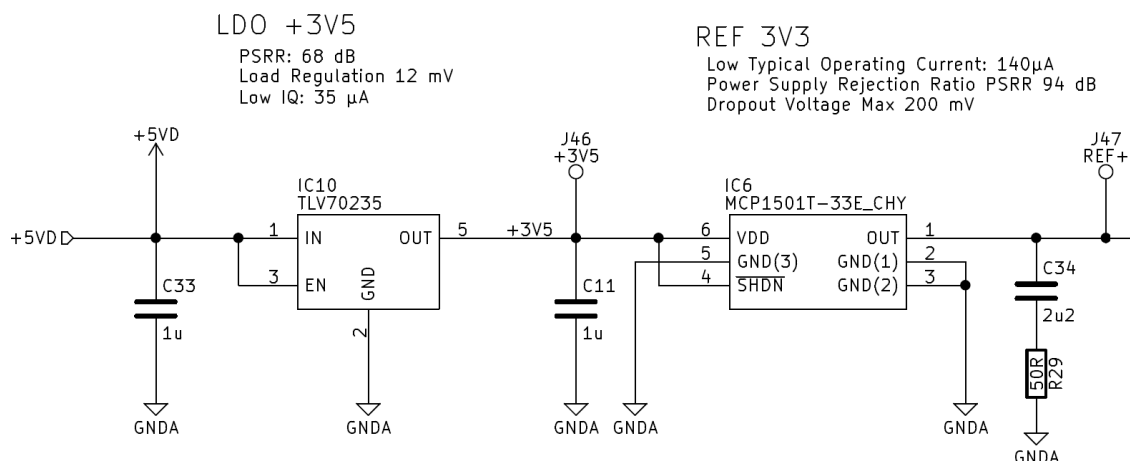
Supply Voltage Reference and peripheral components
 Maximal Output Current 250 mA
 Quiescent Current – PFM Typ 19 μA
 Quiescent Current – PWM Typ 220 μA
 Output Ripple Voltage Typ 200 mV (100mA I_{out})



Obrázek 26 Boost konvertor schéma

4.8 Analogová napájecí část

Obsahuje lineární stabilizátor napětí a napětovou referenci pro analogovou část multifunkčního sensoru. Je napájena z Boost konvertoru.



Obrázek 27 analogová napájecí část

4.8.1 Napěťová reference

Pro realizaci napěťové reference byl zvolen obvod MCP1501. MCP1501 je velmi přesná napěťová reference s přesností 0.1 %. Výstupní napětí je 3.3 V. Teplotní koeficient $50 \frac{ppm}{^{\circ}C}$. Vlastní spotřeba obvodu 140 μA . Vlastní šum $15 \mu V_{p-p}$.

Výstupní napětí reference je odvozeno ze součtu dvou napětí s opačnou teplotní závislostí. Tím je dosaženo nezávislosti výstupního napětí reference na okolní teplotě. Výstupní kondenzátory nejsou pro stabilitu napěťové reference potřeba. Je ale vhodné přidat filtr výstupního šumu na výstup napěťové reference. Jako výstupní filtr je zvolen RC filtr. Mezní frekvenci filtru f_m je možné stanovit z hodnot rezistoru $R_f = 50 \Omega$ a kondenzátoru $C_f = 2.2 \mu F$.

$$f_m = \frac{1}{2\pi(R_f \times C_f)} = \frac{1}{2\pi(50 \times 2.2 \times 10^{-6})} = 1.45 \text{ kHz}$$

Typické hodnoty šumu napětí na výstupu reference se pohybují do $15 \mu V_{p-p}$.

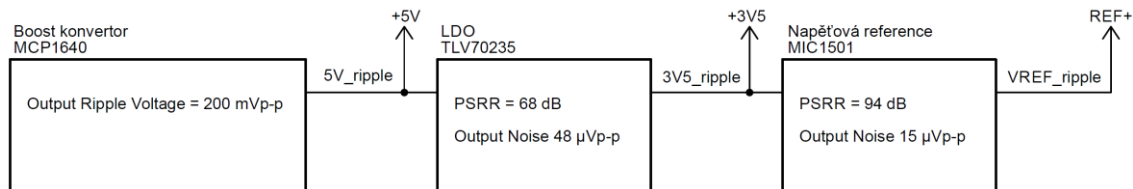
4.8.2 Lineární stabilizátor napětí

Slouží jako zdroj napětí pro napájení napěťové reference a dalších analogových částí multifunkčního sensoru. Vstupní napětí 5 V je generováno Boost konvertorem. Výstupní napětí je fixní 3.5 V. Požadavky na stabilizátor jsou nízká cena a rozumná hodnota PSRR. Pro realizaci byl zvolen obvod TLV70235.

TLV70235 je lineární stabilizátor napětí s nízkým úbytkem napětí v propustném směru LDO. Obvod má nízkou vlastní spotřebu 35 μA . Dobrou odolnost proti přechodovým dějům a nízký vlastní šum $48 \mu V_{p-p}$. Obvod je stabilní s velikostí výstupní kapacity větší než 100 nF.

4.8.3 Výpočet šumu

Pro dosažení co nejmenšího šumu na výstupu napěťové reference je nutné brát ohled i další zdroje jenž výstupní šum ovlivňují. Tím je zejména napájecí kaskádu zdrojů Boost konvertoru MCP1640 a LDO TLV70235.



Obrázek 28 napájecí kaskáda zdrojů

Pro tento účel je třeba počítat s parametrem PSRR. PSRR je schopnost obvodu potlačit pronikání zvlnění napětí a šumu ze vstupu obvodu na jeho výstup

$$PSRR = 20 \log \frac{Ripple_{Input}}{Ripple_{Output}}$$

kde $Ripple_{Input}$ je hodnota zvlnění vstupního napětí, $Ripple_{Output}$ je zvlnění výstupního napětí.

Nejprve vypočteme hodnotu zvlnění na výstupu LDO $3V5_{ripple}$. To je dáno součtem příspěvku vlastního šumu $U_n = 48 \mu V_{p-p}$ obvodu LDO a zvlněním napětí který proniká do obvodu z výstupu obvodu MCP1640.

$$\begin{aligned} 3V5_{ripple} &= U_n + 5V_{ripple} \div 10^{\frac{PSRR}{20}} = 48 \mu V_{p-p} + 200 mV_{p-p} \div 10^{\frac{68}{20}} \\ &= 48 \mu V_{p-p} + 79.6 \mu V_{p-p} = 127.6 \mu V_{p-p} \end{aligned}$$

Jakmile známe hodnotu $3V5_{ripple}$ můžeme určit jaká je hodnota zvlnění napětí $VREF_{ripple}$ na výstupu napěťové reference. Ta je dána rovněž součtem vlastního šumu $U_n = 15 \mu V_{p-p}$ a příspěvkem z výstupu LDO.

$$\begin{aligned} VREF_{ripple} &= U_n + 3V5_{ripple} \div 10^{\frac{PSRR}{20}} = 15 \mu V_{p-p} + 127.6 \mu V_{p-p} \div 10^{\frac{94}{20}} \\ &= 15 \mu V_{p-p} + 3 \mu V_{p-p} = 18 \mu V_{p-p} \end{aligned}$$

Je vidět že hodnota šumu na výstupu napěťové reference $VREF_{ripple}$ je prakticky rovna hodnotě vlastního šumu. LDO je rovněž použito pro napájení analogové části sensoru. Nízké hodnoty $3V5_{ripple}$ pozitivně ovlivňují kvalitu analogové části.

Naopak kdyby nebylo použito LDO pro napájení napěťové reference a napětí by bylo přímo z výstupu obvodu MCP1640 kvalita výstupního napětí napěťové reference by poklesla. Hodnota $VREF_{ripple}$ by byla dána:

$$\begin{aligned} VREF_{ripple} &= U_n + 5V_{ripple} \div 10^{\frac{PSRR}{20}} = 15 \mu V_{p-p} + 200 mV_{p-p} \div 10^{\frac{94}{20}} \\ &= 15 \mu V_{p-p} + 4 \mu V_{p-p} = 19 \mu V_{p-p} \end{aligned}$$

Rozdíl $4 \mu V_{p-p}$ není tak zásadní. Problém by mohl nastat, kdyby napěťová reference měla malou hodnotu PSRR, nebo vstupní napájení mělo nestandardní zvlnění.

4.9 Mikroprocesor:

Byl vybrán obvod ATSAM3S4C od Atmelu. Mikroprocesor MCU výkonný 32 bitový RISC mikroprocesor s jádrem Cortex®-M3. Maximální pracovní frekvence je 64 MHz. Obsahuje 256 KB flash paměti, 48 KB SRAM. Tato verze MCU je ve 100 pinovém LQFP pouzdře.

Periferie MCU zahrnují podporu Full Speed USB portu, rozhraní pro SD kartu, paměťový řadič pro paměti typu SRAM, PSRAM, NOR flash, 12 bitový AD převodník, a standardní komunikační rozhraní typu USART, UART, I2C SPI.

4.10 Paměť

Jako primární uložisko dat slouží mikro SD karta. Karta je uložena v konektoru na SD kartu.

4.11 Digitální rozhraní

Obsahuje obvody, které umožňují multifunkčnímu sensoru komunikovat s okolím. Pro bezdrátovou komunikaci je použit komunikační modul XBee® DigiMesh 2.4. Jako další rozhraní obsahuje multifunkční sensor standard RS-232 a RS-485.

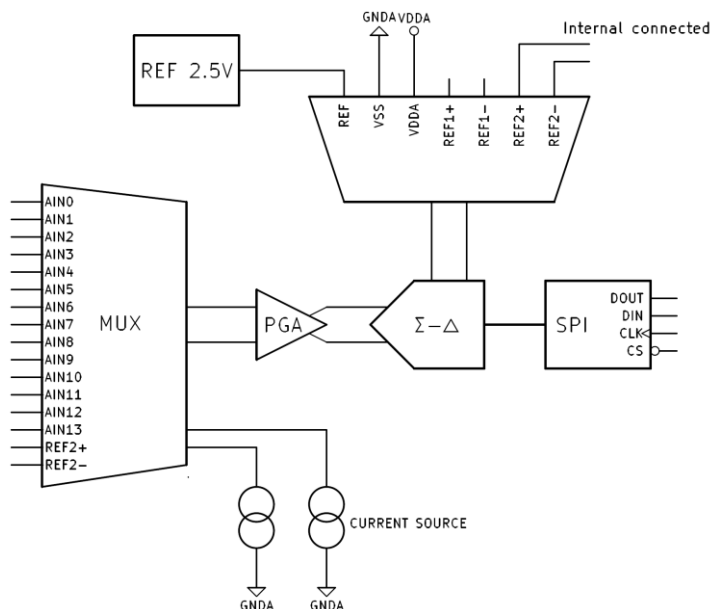
4.12 Analogové rozhraní

Umožňuje multifunkčnímu sensoru měřit analogové veličiny. Mezi měřené veličiny patří napětí a odpor. Měření proudu je rovněž možné je však nutné zapojit do proudové smyčky rezistor. Analogové veličiny lze měřit na šesti diferenčních kanálech. To umožňuje zapojit až 12 single-ended měření napětí, 6 diferenčních měření napětí, 6 měření typu RTD, 6 proudových měření.

Pro realizaci analogového rozhraní je použit obvod AD7124.

4.12.1 Obvod AD7124

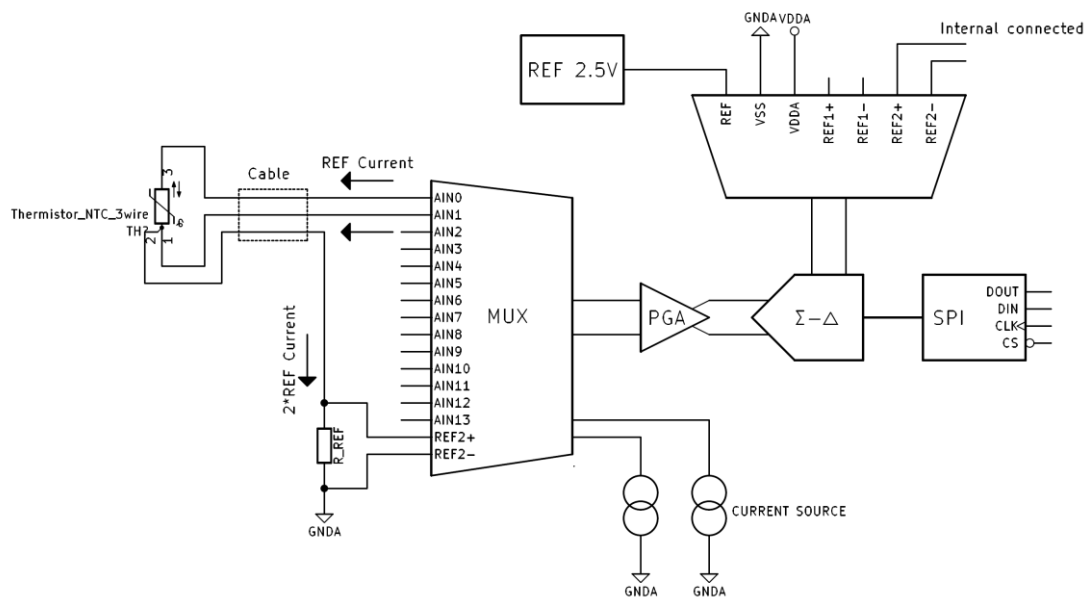
Obvod v sobě integruje kompletní analogový front-end pro precizní měřicí aplikace. Obvod obsahuje nízko šumový 24 bitový sigma delta AD převodník, analogový zesilovač s programovatelným ziskem PGA zisk až 128krát. Multiplexor MUX pro přepínání vstupních kanálů. Počet vstupních kanálů je 8. Napětíovou referenci VREF 2.5 V, nastavitelný proudový zdroj s dvojitým výstupem od 50 μ A do 1.5 mA. Digitální filtr, SPI rozhraní a možnost detekce zátěže na vstupních kanálech. Zjednodušené vnitřní schéma obvodu je na Obrázek 29.



Obrázek 29 Vnitřní schéma obvodu AD7124

4.12.2 RTD měření

Slouží k měření odporu termistoru. Odpor termistoru je na základě převodní charakteristiky převeden na teplotu. RTD je odporový teplotní detektor. Měření je provedeno jako tří vodičové Obrázek 30. To poskytuje výhody v podobě eliminace vlivu přívodních kabelů k termistoru. Podmínka je, aby měl kabelový svazek stejný odpor všech tří vodičů. To je zpravidla dodrženo, jestliže je použit kabelový svazek se stejně dlouhými vodiči uvnitř a kabel je dobře zapojen pro eliminaci přechodových odporů v konektorech. [40]



Obrázek 30 Tří vodičové RTD měření

Nyní můžeme vyjádřit napětí na termistoru V_{th} jako:

$$V_{th} = I_{ref} * R_{th}$$

kde R_{th} je odpor termistoru, I_{ref} je referenční proud. Obdobně vyjádříme napětí na referenčním odporu V_{ref} :

$$V_{ref} = 2 \times I_{ref} * R_{ref}$$

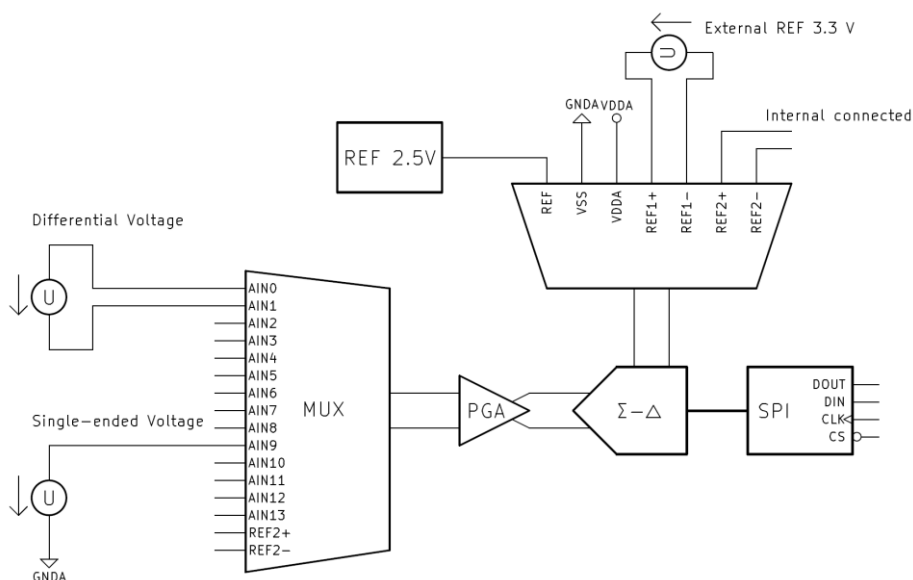
kde R_{ref} je hodnota referenčního rezistoru. Po úpravě rovnic dostaneme výraz, který popisuje výpočet R_{th} ze známých hodnot:

$$R_{th} = 2 \times R_{ref} \times \frac{V_{th}}{V_{ref}}$$

Je vidět že hodnota I_{ref} nemá na měření vliv. Tato skutečnost je podmíněna shodnou velikostí obou referenčních proudů I_{ref} . Ty jsou generovány pomocí stejné reference a výrobce udává jejich vzájemnou odchylku na 0.5 %.

4.12.3 Měření napětí

Napětí je možné měřit diferenčně či single-ended viz Obrázek 31. Jako napěťová reference napětí pro AD převodník může sloužit interní reference REF 2.5 V, nebo externí 3.3 V reference generovaná obvodem MIC1501. Externí reference 3.3 V dosahuje lepších parametrů než interní reference 2.5 V. Primárně je tedy napětí pro AD převodník odebíráno z externí 3.3 V reference.



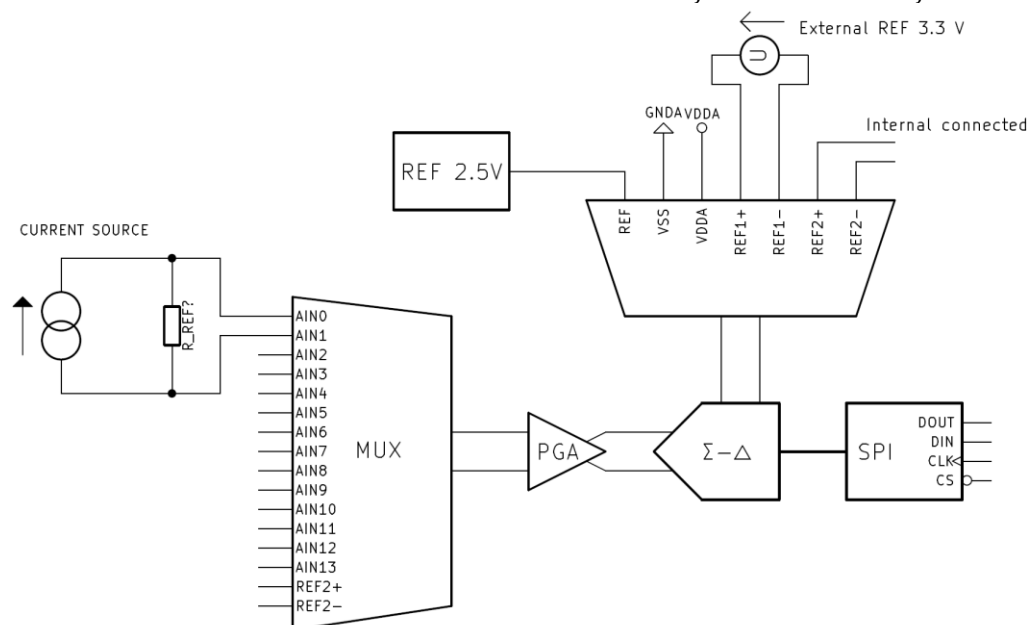
Obrázek 31 Diferenční a single-ended napěťové měření

4.12.4 Měření proudu

Aby byl obvod schopen měřit proud je nutné připojit zároveň se senzorem proudu do proudové smyčky i referenční rezistor R_{ref} viz Obrázek 32. Lze říci že hodnota proudu se zprostředkovaně měří pomocí napětí. Velikost R_{ref} musí být zvolena s ohledem na zdroj měřeného proudu I_{meas} . Musí platit:

$$R_{ref} \times I_{meas} = V_{in} < V_{ref}$$

Kde V_{ref} je hodnota referenčního napětí, V_{in} je hodnota napětí na vstupu AD převodníku. V_{ref} může nabývat hodnot 2.5 V nebo 3.3 V. Obecně by měl být pracovní rozsah napětí na vstupu V_{in} AD převodníku mezi hodnotami $0.1V_{ref} < V_{in} < 0.9V_{ref}$.



Obrázek 32 Proudové měření

4.13 Spotřeba energie

Na základě známých hodnot spotřeby jednotlivých obvodů můžeme stanovit přibližnou vlastní spotřebu energie multifunkčního sensoru. Výpočet zahrnuje případ, kdy jsou všechny elektrické obvody multifunkčního sensoru napájeny z baterie. Z následných hodnot můžeme stanovit dobu života baterií. Pro následující výpočet je uvažováno několik zjednodušení:

- Nejsou uvažovány průsakové proudy pasivních součástek, diod a tranzistorů
- Účinnost konverze napájecích zdrojů je 100%
- Spotřeba externích sensorů není zahrnuta

Podmínky spotřeby. Multifunkční sensor trvale setrvává ve stavu spánku. Jakmile je dán k podnět ke změření veličin, či příkaz od uživatele, sensor se probere z režimu spánku a přejde do operačního režimu. V jednotlivých režimech se spotřeba proudu u jednotlivých komponent liší. Je uvažován případ, kdy se sensor pravidelně probouzí každých 5 min. Tj. 12x za hodinu. Sensor setrvává v operačním režimu jen po nutnou dobu provedení potřebných úkonů. Tato doba je označena jako aktivní doba. Za těchto podmínek můžeme spočítat spotřebu elektrické energie. Spotřeba je vztažena ke zdroji napájení 3.3 V a je vyjádřena v $\mu\text{A/h}$.

Tabulka 4 Spotřeba energie multifunkčního sensoru

Obvod	Popis	Pracovní napětí	Spotřeba proudu		Aktivní doba	Četnost měření	Spotřeba za 1 hod
			režim spánku	operační režim			
[-]	[-]	[V]	[μA]	[μA]	[s]	[počet/h]	[μA/h]
ATSAM3S4C	MCU	3.3	20	32000	5	12	553
STM1818	Reset IC	3.3	4	4			4
TPS63031	3.3 V Power IC	3.3	25	25			25
MCP1640	5 V Power IC	5	1	100	3	12	3
TLV70235	3.5 V LDO IC	5	1	35	3	12	2
MCP1501	3.3 V REF IC	3.5	1	140	3	12	3
MIC2091	Switch IC*	3.3	20	100	3	12	21
SD karta	Memory IC	3.3	1	20000	3	12	201
AD7124	Analog IC	3.3	7	355	3	12	10
Xbee	Xbee module	3.3	1	35000	5	12	584
ISL3170E	Interface IC	3.3	1	375	3	12	5
ICL3221E	Interface IC	3.3	1	700	3	12	8
BME280	Sensor IC	3.3	1	3	3	12	1

Celková suma: 1420

Je vidět že celková spotřeba energie je přibližně 1.4 mA/h. Nyní můžeme stanovit životnost baterií.

4.14 Životnost baterií

Následující výpočet provedeme pro obě verze baterií. Zapojení baterií je dvě baterie v sérii. Napětí baterií na vstupu Buck-Boost konvertoru je dvojnásobek nominálního napětí jedné baterie. Účinnost konvertoru je uvažována 90 %. Spotřeba na 3.3 V je 1.4 mA/h.

Tabulka 5 Životnost baterií

Baterie	Napětí	Kapacita	Životnost	
			[h]	[dnů]
Alkalická	3	2700	1578	65.7
Ni-MH	2.4	1900	888	37.0

Predikovaná životnost baterií se pohybuje v rámci jednotek měsíců. Pro případ že není k dispozici jiný zdroj energie než baterie. Situace se samozřejmě změní, jakmile připojíme k multifunkčnímu sensoru solární panel či jiný externí zdroj.

Při použití solárního panelu a alkalických baterií se životnost baterií změní v poměru hodin, během kterých dodává solární panel energii. Takto můžeme prodloužit životnost baterií o desítky procent.

Použití Ni-MH baterií a solárního panelu umožňuje výrazně prodloužit životnost baterií. Při úvaze že multifunkční sensor má sám o sobě spotřebu energie 1.4 mA/h a solární panel je schopen za příznivých podmínek dodávat proud okolo 300 mA můžeme říci, že většina proudu slouží k udržování baterií v plně nabitým stavu. Životnost Ni-MH baterií se tak v zásadě znásobí dle počtu dobíjecích cyklů baterie. Počet dobíjecích cyklů je roven 500. Tím se dá docílit prakticky neomezené životnosti baterie.

4.15 Deska plošných spojů

Deska plošných spojů DPS realizuje fyzické propojení jednotlivých komponent multifunkčního sensoru. DPS i schéma multifunkčního sensoru je vytvořeno v programu Kicad EDA. [41] DPS je realizována jako čtyř vrstvá, 1 mm silná. Rozdělení vrstev a složení zobrazuje Obrázek 33.



Obrázek 33 Složení DPS upraveno a převzato z [42]

Vnější vrstvy DPS Top a Bottom jsou využity pro signálové vodiče. Vnitřní dvě vrstvy slouží pro rozvod napájení a země. DSP je dimenzovaná tak aby splňovala kritéria páte konstrukční třídy. [42]

4.15.1 USB 2.0 diferenciální pár

USB 2.0 pro korektní fungování požaduje dodržet návrhová kritéria co se týče DPS. [43] USB 2.0 datový pár musí mít předepsanou charakteristickou impedanci. Datový pár by měl mít co nejprímější cestu mezi dvěma body, respektive mezi konektorem a MCU. Rovněž i další věci. Parametry popisující USB 2.0 diferenciální pár zahrnují charakteristickou impedanci vlastního datového vodiče a diferenciální impedanci datového páru.

Tabulka 6 USB 2.0 diferenciální pár hodnoty impedancí

Parametr	Min	Typ	Max	Jednotka
USB 2.0 Diferenciální impedance datového páru	81	90	99	Ω
USB 2.0 Charakteristická impedance vlastního datového vodiče	51	60	69	Ω

Na základě těchto požadavků je dimenzován USB 2.0 diferenciální pár. Pro výpočet je použit program SATURN PCB Design Toolkit. [44] Vstupní data pro výpočet jsou rozměry či složení DPS, materiál dielektrika a rozměry diferenciálního páru. Program vypočítá na základě těchto dat hodnoty dvojice impedancí.

The screenshot shows the SATURN PCB Design Toolkit interface. On the left, under 'Differential Pairs', the input fields are: Conductor Width (W) = 0.2 mm, Conductor Spacing (S) = 0.2 mm, and Conductor Height (H) = 0.175 mm. Below these, it shows W/H = 1.143 and S/H = 1.143. In the center, the 'Target Zdiff' is set to 90 Ohms. Below this, the calculated 'Zdiff' is 94.883 Ohms, 'Zo' is 56.494 Ohms, and the tolerance is +/- 10%. On the right, the 'Options' section includes 'Base Copper Weight' (18um), 'Substrate Options' (FR-4 STD), 'Plating Thickness' (35um), and 'Differential Layer' (Edge Cpld Ext). The 'Information' section at the bottom shows 'Total Copper Thickness' as 53 um and 'Via Thermal Resistance' as N/A.

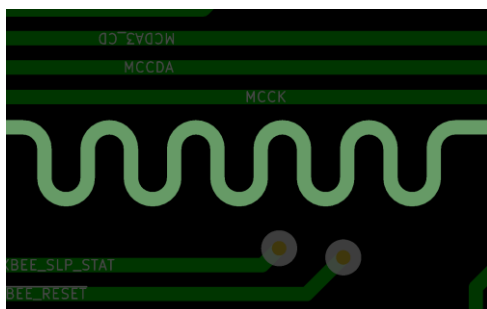
Obrázek 34 SATURN PCB Toolkit výpočet USB 2.0 diferenciálního páru

Z výsledku výpočtu programu je zřejmé že navrhnutý diferenciální pár splňuje doporučené požadavky. Kde diferenciální impedance datového páru je 94.8 Ω a charakteristická impedance vlastního datového vodiče je 56.5 Ω .

4.15.2 Paralelní datové sběrnice

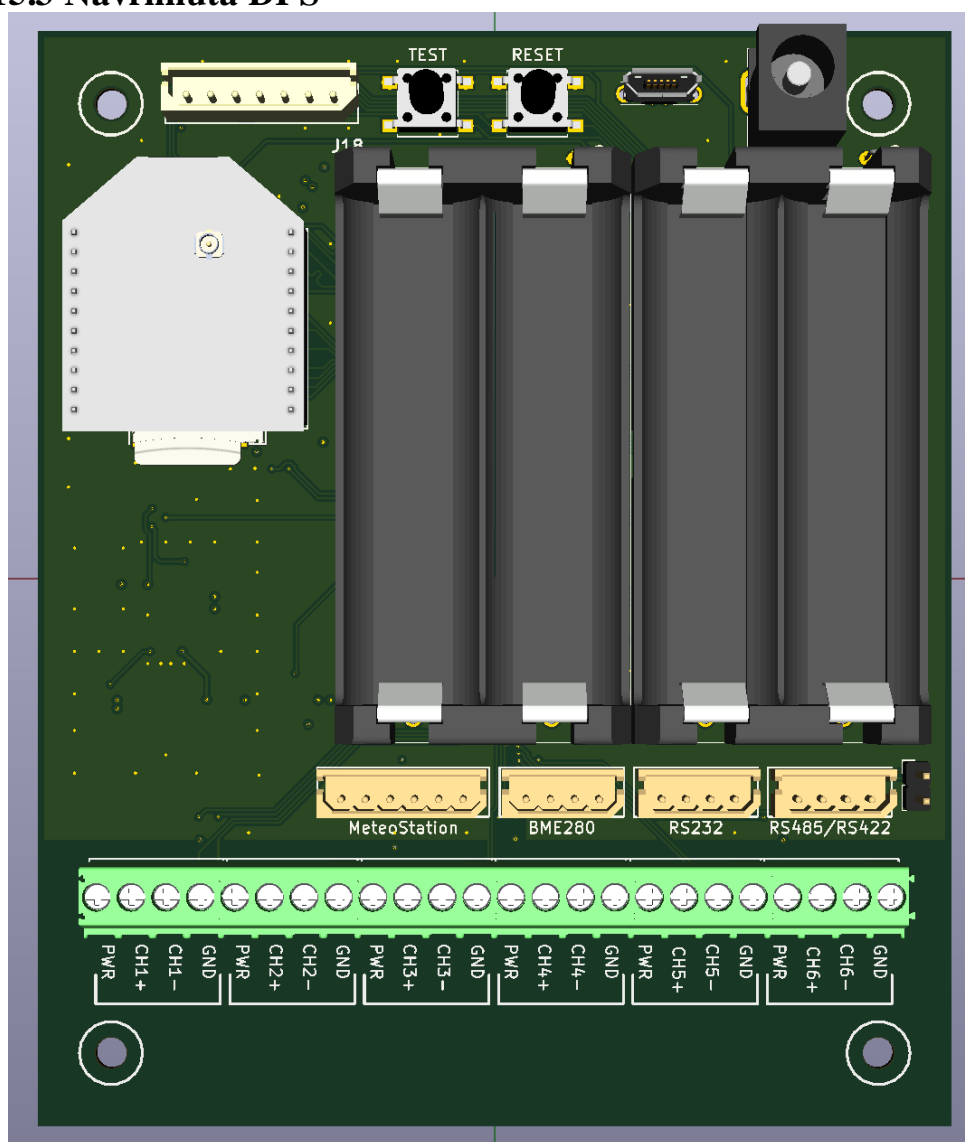
Rozhraní mikro SD karty, SPI sériové periferní rozhraní a JTAG jsou synchronní datové sběrnice. Mikro SD karta využívá vysokorychlostní multimediální rozhraní. Rozhraní obsahuje hodinový signál a 4 bitovou paralelní sběrnici.

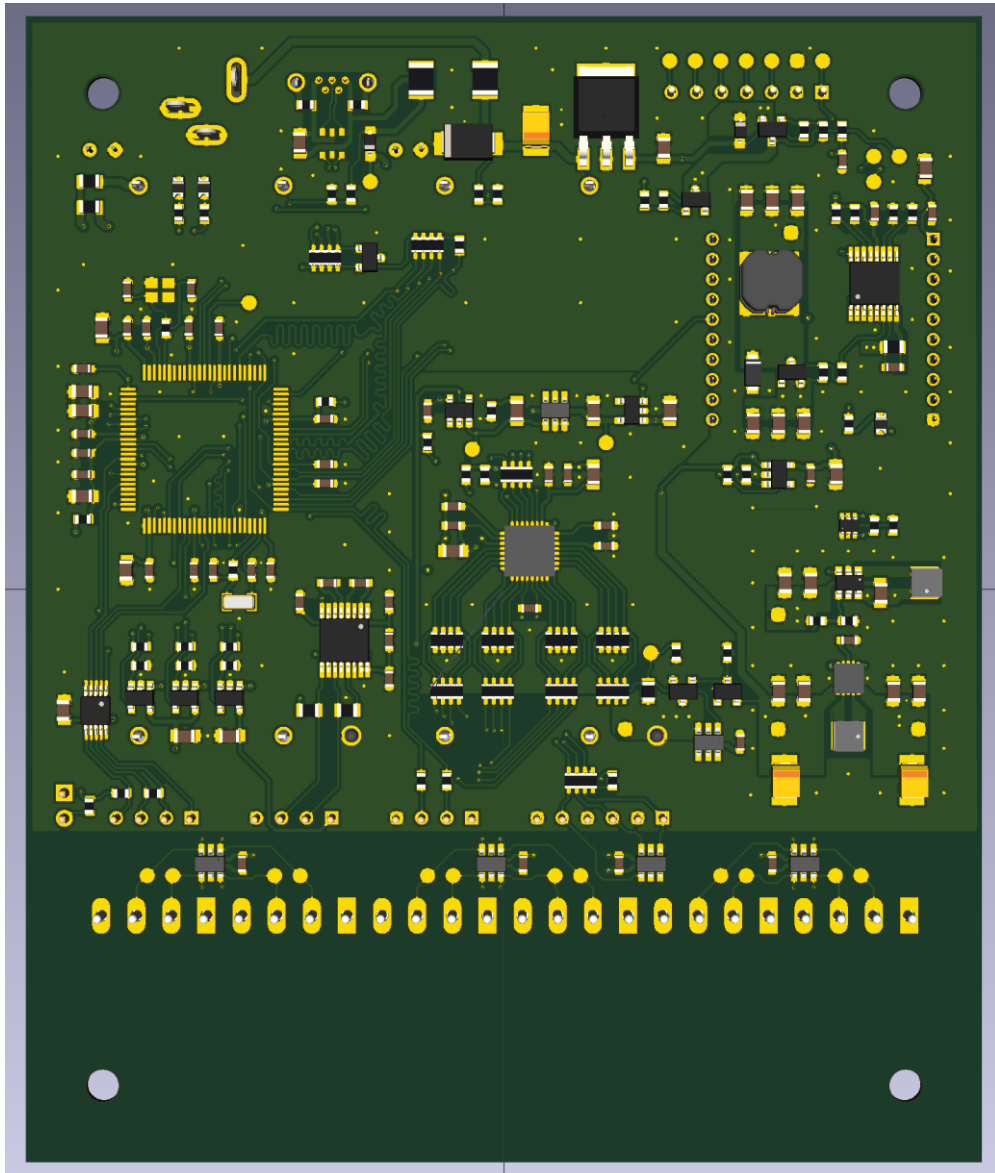
U těchto datových sběrnic je vhodné dodržet stejné délky datových vodičů. K tomu je na DPS použit na vodičích meandr viz Obrázek 35, který vyrovná délky vodičů u konkrétních rozhraní.



Obrázek 35 Kompenzace délky vodiče pomocí meandru

4.15.3 Navrhnutá DPS



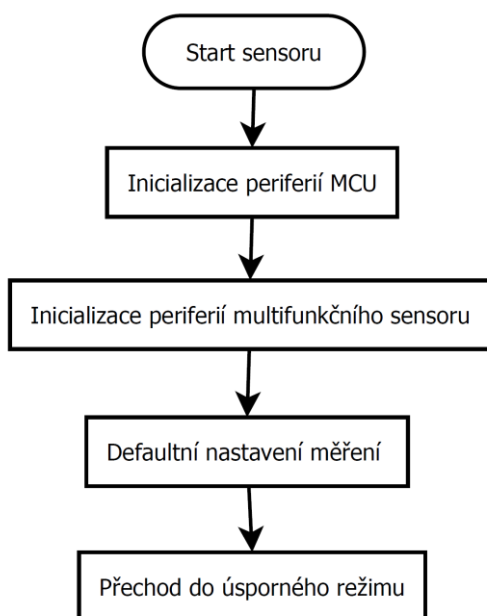


5 SOFTWARE

Pro vývoj softwaru je zvoleno vývojové prostředí IDE Atmel Studio 7. IDE umožňuje vytvářet aplikace psané v jazyce C/C++, nebo assembleru. Hlavní podporu IDE soustředí podporu vlastního portfolia produktů výrobce Atmel. Jmenovitě na podporu MCU rodiny AVR® a SAM. IDE zahrnuje podporu standartních knihoven a driverů na periferie MCU.

5.1 Program multifunkčního sensoru

Jakmile je sensor uveden do činnosti připojením do zdroje či vložením baterií dojde k spuštění programu. Rovněž po resetování dojde opětovnému spuštění programu. Program po spuštění na inicializuje periferie MCU. S funkčními periferiemi začne MCU obsluhovat příslušné periferie multifunkčního sensoru. Během této doby dojde mezi MCU a periferiemi multifunkčního sensoru k základní výměně informací jako status apod. Po inicializaci periferií dojde k defaultnímu nastavení měřených veličin. Nastavení obsahuje, jaké veličiny a na kterém portu či rozhraní se budou měřit. Dále pak s jakou četností se budou měření spouštět. Poté program přechází do úsporného režimu. Cyklus je zobrazen na Obrázek 36.



Obrázek 36 Program multifunkčního sensoru

5.1.1 Cyklické měření

MCU se pravidelně probouzí z úsporného režimu. Po probuzení dojde ke změření veličin dle nastavení. Změřená data se uloží na mikro SD kartu. Poté program přechází do úsporného režimu.

5.1.2 Přerušení

MCU se standardně nachází v režimu spánku. Z tohoto stavu lze MCU probudit několika událostmi (zdroji).

- Impuls informující o sepnutí anemometru.
- Impuls informující o sepnutí srážkoměru.
- Detekce napětí na USB portu.
- Detekce napětí na DC konektoru portu.
- Detekce vložení mikro SD karty do konektoru.
- Žádost o probuzení od Xbee modulu.
- Impuls od testovacího tlačítka.
- Informace o nabíjení od nabíječky.

Po probuzení MCU vlivem některé z událostí následuje zpracování podnětu probuzení. Například při sepnutí srážkoměru dojde ke zvýšení hodnoty úhrnu srážek. Po zpracování podnětu MCU opět dochází k přechodu do úsporného režimu.

5.2 Seznam příkazů

Zde je seznam příkazů, na které multifunkční sensor reaguje. Příkazy přijímá sensor ze sítě DigiMesh nebo z USB portu.

Tabulka 7 Seznam příkazu multifunkčního sensoru

Příkaz	Akce
TM	Odešle hodnotu aktuálního času sensoru
RA	Odešle hodnotu úhrnu srážek
WD	Odešle hodnotu směru větru
WS	Odešle hodnotu rychlosti větru
PS	Odešle hodnotu atmosférického tlaku
TE	Odešle hodnotu teploty vzduchu
HU	Odešle hodnotu vzdušné vlhkosti
AD	Odešle hodnoty změřených veličin na analogovém rozhraní

Data, respektive naměřené hodnoty se posílají ve formátu string. Naměřené hodnoty se rovněž ukládají na mikro SD kartu.

ZÁVĚR

Diplomová práce se zabývala vytvořením multifunkčního sensoru pro agronomická měření. Veškerý

Vývoj softwaru pro multifunkční sensor probíhal na vývojovém kytu pro použitý typ mikroprocesoru ATSAM3S4C. Během vývoje softwaru, rozcházení jednotlivých periférií MCU a následně periférií multifunkčního sensoru vznikala myšlenka na fyzickou realizaci multifunkčního sensoru. Ze znalosti parametrů periférií pak vyplynuli konkrétní požadavky na napájecí zdroje, baterie, typy rozhraní a další dílčí komponenty.

Fyzická realizace multifunkčního sensoru je dokončena. Realizace se snaží maximálním způsobem vyhovět požadavkům zadání. Fyzická realizace umožňuje realizovat až 12 single-ended napětových měření nebo 6 diferenčních napětových měření nebo 6 proudových měření nebo 6 měření typu RTD nebo libovolnou kombinaci z nich. Množství měření se odvíjí od počtu měřících kanálů, kterých má multifunkční sensor 6. Co se týče digitálních sensorů nabízí multifunkční sensor připojení pro enviromentální sensor BME280 na I2C sběrnici, rozhraní pro meteostanici a komunikační standardy RS232 a RS485. V případě použití CO2 sensoru je použito rozhraní RS232. Do budoucna by multifunkční sensor rovněž mohl obsahovat rozhraní pro komunikační protokol SDI-12 [45]. Ten se v poslední době začíná hojně vyskytovat zejména u pokročilých půdních sensorů [46].

Jako primární paměťové uložení dat multifunkčního sensoru slouží mikro SD karta. Mikro SD karta má značnou spotřebu elektrické energie. To je sice řešeno vypínačem, který SD kartu vypne, jakmile není používána, ale lepší řešení by mohlo být použití jiného druhu paměti. Například NOR Flash paměti. Během vývoje softwaru byla odzkoušena varianta s paměťovým uložení typu NAND Flash. Co se týče programové obsluhy paměti není rozdíl v tom, jestli se pracuje s SD kartou či NAND Flash pamětí. NAND Flash paměť pak má výhodu zejména ve spotřebě energie.

Co se týče programové části multifunkčního sensoru zde bylo provedeno měření s enviromentálním senzorem BME280, meteostanicí a obvodem AD7124 prostřednictvím něhož bylo provedeno měření napětí a měření teploty založené na měření typu RTD. CO2 sensor nebyl odzkoušen. Půdní sensor byl odzkoušen low-cost typ založený na půdní rezistivitě.

Bezdrátová komunikace prostřednictvím komunikačního modul XBee® DigiMesh 2.4 je funkční. Nejsou sice dokončené některé věci na kompletní ovládání modulu jako je například update firmwaru modulu XBee®. Ale vytvořená síť DigiMesh funguje dobře.

Použitý mikroprocesor MCU SAM3S4C pravděpodobně ve druhém kvartálu roku 2018 dosáhl stavu není doporučeno pro nové designy. MCU je na trhu poměrně dlouho, a tak nezbyvá nic jiného než do další verze multifunkčního sensoru využít novější typ MCU. Zde bych zmínil nové trendy v oblasti MCU [47]. Výrobci začínají přicházet z MCU, které mají integrované analogové RF frond-endy určené pro bezdrátovou komunikaci. Do budoucna je takovýto komplexní systém určitě výhodou a lze zvážit jeho implementaci.

Firma DIGI přišla na trh s novou řadou komunikačních modulů, která je novější verzí komunikačního modulu XBee® DigiMesh 2.4, který je použit na konstrukci multifunkčního sensoru. Podpora pro starší však verzi stále přetrvává.

LITERATURA

- [1] *Základy pedologie a ochrany půdy: 5. přednáška* [online]. [cit. 2016-11-15]. Dostupné z: <http://pedologie.czu.cz/prednasky/zpop/zpop5.pdf>
- [2] BME280 Integrated Environmental Units. *Bosch Sensortec* [online]. [cit. 2016-11-20]. Dostupné z: https://www.bosch-sensortec.com/bst/products/all_products/bme280
- [3] Final data sheet. *BME280: Combined humidity and pressure sensor* [online]. 2015 [cit. 2016-11-20]. Dostupné z: https://ae-bst.resource.bosch.com/media/tech/media/datasheets/BST-BME280_DS001-11.pdf
- [4] *IoT augmented with STM32 MCUs & LoRa™* [online]. [cit. 2016-11-20]. Dostupné z: http://www.st.com/content/ccc/resource/sales_and_marketing/presentation/product_presentation/group0/b5/72/c6/ec/c8/e3/4a/8c/IoTaugmented_stm32-lrwan/files/IoTaugmented_stm32-lrwan.pdf/jcr:content/translations/en.IoTaugmented_stm32-lrwan.pdf
- [5] LSM303AGR: Ultra-compact high performance eCompass Module [online]. STMicroelectronics, 2016 [cit. 2016-11-28]. Dostupné z: <http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/74/c4/19/54/62/c5/46/13/DM00177685.pdf/files/DM00177685.pdf/jcr:content/translations/en.DM00177685.pdf>
- [6] CARBON DIOXIDE INFRARED SENSOR [online]. Dynament Limited, 2006 [cit. 2016-11-28]. Dostupné z: http://www.gassensor.ru/data/files/carbon_dioxide/tds0036_MSH-P-CO2.pdf
- [7] THEORY AND OPERATION OF NDIR SENSOR [online]. Rae Systems by Honeywell, 2006 [cit. 2016-11-28]. Dostupné z: http://www.raesystems.com/sites/default/files/content/resources/Technical-Note-169_Theory-and-Operation-of-NDIR-Sensors_04-02.pdf
- [8] CO₂, výnosy, praktiky, masakry [online]. Grower [cit. 2016-11-28]. Dostupné z: <http://grower.cz/forum/showthread.php?threadid=40142>
- [9] SCHOTLAND, R. M. *The measurement of wind velocity by sonic means* [online]. 1954 [cit. 2016-12-02]. Dostupné z: <http://www-personal.umich.edu/~bkerkez/courses/cee575/Handouts/8SonicAnemom.pdf>. New York University.
- [10] *Biral Meteorological Sensor: Ultrasonic Anemometer 3D* [online]. [cit. 2016-12-02]. Dostupné z: <http://www.biral.com/product/ultrasonic-anemometer-3d-4-3830-20-340/>
- [11] *Argent Data Systems: Weather Sensor Assembly p/n 80422* [online]. [cit. 2016-12-02]. Dostupné z: https://www.argentdata.com/files/80422_datasheet.pdf
- [12] PETRÁSEK, Jan a Jaroslav SYNEK. *On-line: Geologická encyklopedie* [online]. In: . [cit. 2016-12-02]. Dostupné z: <http://www.geology.cz/aplikace/encyklopedie/term.pl?puda>
- [13] SKIERUCHA, Wojciech a Andrzej WILCZEK. *A FDR Sensor for Measuring Complex Soil Dielectric Permittivity in the 10-500 MHz Frequency Range*. 2010.
- [14] DOBRIYAL, Pariva, Ashi QURESHI, Ruchi BADOLA a Syed AINUL HUSASIN. *Journal of Hydrology: A review of method available for estimating soil moisture and its implications for water resource management*. In: . Wildlife Institute of India, 2012.
- [15] *AT Delta-T Devices: SM300 Soil Moisture Sensor* [online]. Delta-T Devices, 2016 [cit. 2016-12-04]. Dostupné z: <http://www.delta-t.co.uk/product/sm300/>
- [16] LEKSHMI S.U, Susha, D.N SINGH a Maryam SHOJAEI BAGHINI. *Measurement: A critical review of soil moisture measurement*. Indian Institute of Technology Bombay, 2014.

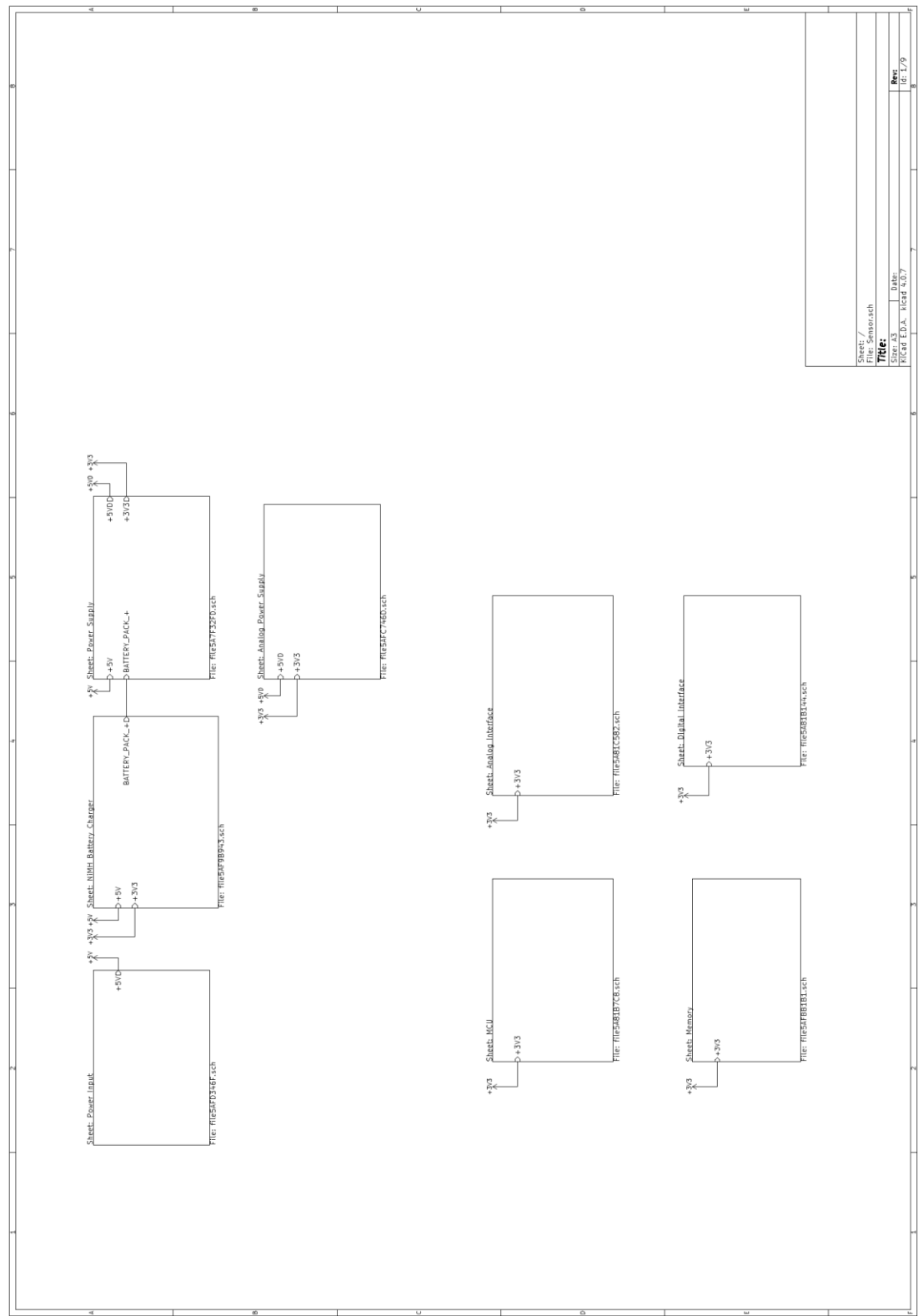
- [17] *Precise Moisture Measurement: IMKO Micromodultechnik GMBH* [online]. [cit. 2016-12-06]. Dostupné z: <https://imko.de/en/products/soilmoisture/mobile-trime-meters/picobt>
- [18] *Physicus: EasyLogGSM* [online]. Bratislava [cit. 2016-12-06]. Dostupné z: <http://www.physicus.eu/datasheets/EasyLogGSM.pdf>
- [19] *AT Delta-T Devices: HH2 Moisture Meter - Readout Unit* [online]. 2016 [cit. 2016-12-06]. Dostupné z: <http://www.delta-t.co.uk/product/hh2/#overview>
- [20] *CMT Moisture Meters: State Of The Art Environmental Monitoring. GlobeLog* [online]. [cit. 2016-12-07]. Dostupné z: <http://www.clients.rainend.com/cmtmoisturemeters.com.au/product/globelog>
- [21] *AT Delta-T Devices: HH2 Moisture Meter-Readout Unit* [online]. Delta-T Devices, 2016 [cit. 2016-12-10]. Dostupné z: <http://www.delta-t.co.uk/product/hh2/#overview>
- [22] *DIN IEC 751 Temperature/Resistance Table for Platinum Sensors* [online]. [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <https://www.lakeshore.com/Documents/F038-00-00.pdf>
- [23] R. EGLI, Peter. *LPWAN Technologies for Internet of Things (IoT) and M2M Scenarios* [online]. In: . 2015, s. 11 [cit. 2016-12-10]. Dostupné z: <http://www.slideshare.net/PeterREgli/lpwan>
- [24] ČERNOHORSKÝ, D., NOVÁČEK, Z., RAIDA, Z. *Elektromagnetické vlny a vedení. 2. rozšířené a přepracované vydání. Brno: Nakladatelství VUTIUM, 1999. ISBN 80-214-1261-5.*
- [25] *ITU: Committed to connecting the world* [online]. [cit. 2016-12-11]. Dostupné z: <http://www.itu.int/en/Pages/default.aspx>
- [26] *LoRa Alliance: Wide Area Networks for IoT* [online]. [cit. 2016-12-11]. Dostupné z: <https://www.lora-alliance.org/>
- [27] , Shan-x. *Information Security: Security of an IoT network using AES (LoRaWAN)* [online]. In: . 2016 [cit. 2016-12-11]. Dostupné z: <http://security.stackexchange.com/questions/126987/security-of-an-iot-network-using-aes-lorawan/142813#142813>
- [28] *České Radiokomunikace* [online]. [cit. 2016-12-11]. Dostupné z: <https://www.cra.cz/iot>
- [29] *European Standard: ETSI EN 300 220-1. 650 Route des Lucioles: F-06921 Sophia Antipolis Cedex - FRANCE, 2012.*
- [30] *DiGi* [online]. [cit. 2016-12-11]. Dostupné z: <https://www.digi.com/>
- [31] *IEEE 802.15.4-2015* [online]. 2015 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <https://standards.ieee.org/findstds/standard/802.15.4-2015.html>
- [32] *DIGI: XBEE® 868LP FOR EUROPE* [online]. 2015 [cit. 2016-12-12]. Dostupné z: https://www.digi.com/pdf/ds_xbee868lp.pdf
- [33] *DIGI: XBEE® SX MODULES* [online]. 2015 [cit. 2016-12-12]. Dostupné z: <https://www.digi.com/pdf/ds-xbee-xbeepro-sx-modules.pdf>
- [34] *DIGI XBEE® S2C DIGIMESH® 2.4* [online]. [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: https://www.digi.com/pdf/ds_s2c-xbeedigimesh-24.pdf
- [35] *Linx technologies: ANT-868-PW-QW-xxx* [online]. 2015 [cit. 2016-12-12]. Dostupné z: <http://www.linxtechnologies.com/resources/data-guides/ant-868-pw-qw.pdf>
- [36] *Linx technologies: ANT-916-PW-QW-xxx* [online]. 2015 [cit. 2016-12-12]. Dostupné z: <http://www.linxtechnologies.com/resources/data-guides/ant-916-pw-qw.pdf>
- [37] *DIGI: Wireless Mesh Networking Zigbee® vs. DigiMesh™* [online]. 2015 [cit. 2016-12-12]. Dostupné z: https://www.digi.com/pdf/wp_zigbeevsdigimesh.pdf
- [38] *SparkFun: SparkFun Photon Weather Shield* [online]. [cit. 2016-12-13]. Dostupné z: <https://www.sparkfun.com/products/13630>
- [39] *BATTEX: O bateriích a akumulátorech víme vše!* [online]. [cit. 2017-04-24]. Dostupné z: <http://shop.battex.cz/vyroby/1S1P-UR18650FKP.php>
- [40] *RTD Measurement and Theory* [online]. [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <https://www.omega.com/techref/rtd-measurement-and-theory.html>
- [41] *KiCad EDA* [online]. [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <http://kicad-pcb.org/>

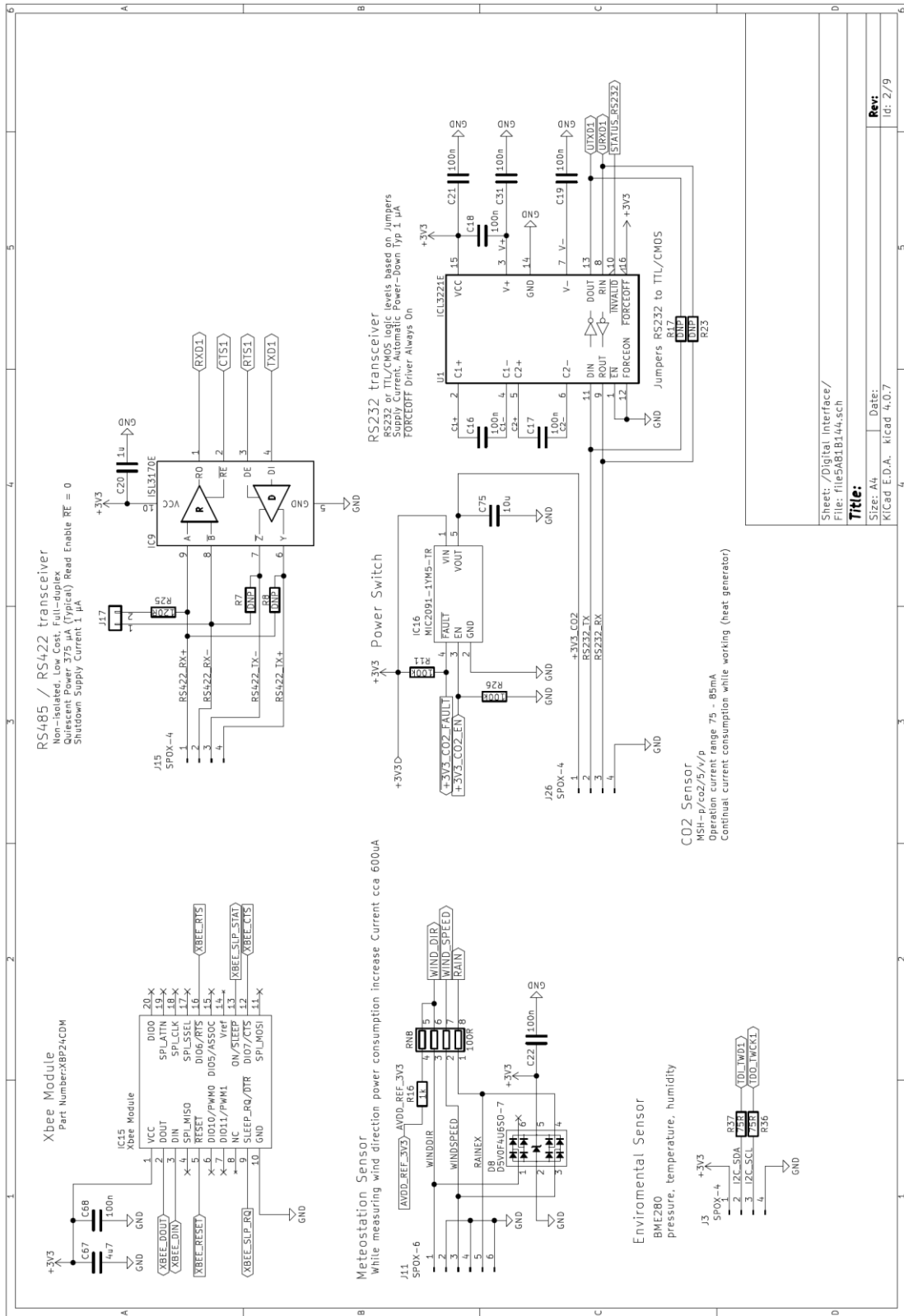
- [42] *Gatema* [online]. [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <https://www.gatema.cz/>
- [43] *High-Speed Interface Layout Guidelines* [online]. 2017 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/an/spraar7g/spraar7g.pdf>
- [44] *SATURN PCB Design Toolkit* [online]. [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: http://www.saturnpcb.com/pcb_toolkit.htm
- [45] *SDI-12 Support Group* [online]. [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: <http://www.sdi-12.org/>
- [46] *Soil Moisture, Temperature, and Electrical Conductivity* [online]. [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: <https://www.metergroup.com/environment/products/ech2o-5te-electrical-conductivity/>
- [47] *SimpleLink Multi-Standard CC2652R Wireless MCU* [online]. [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: <http://www.ti.com/product/cc2652r>

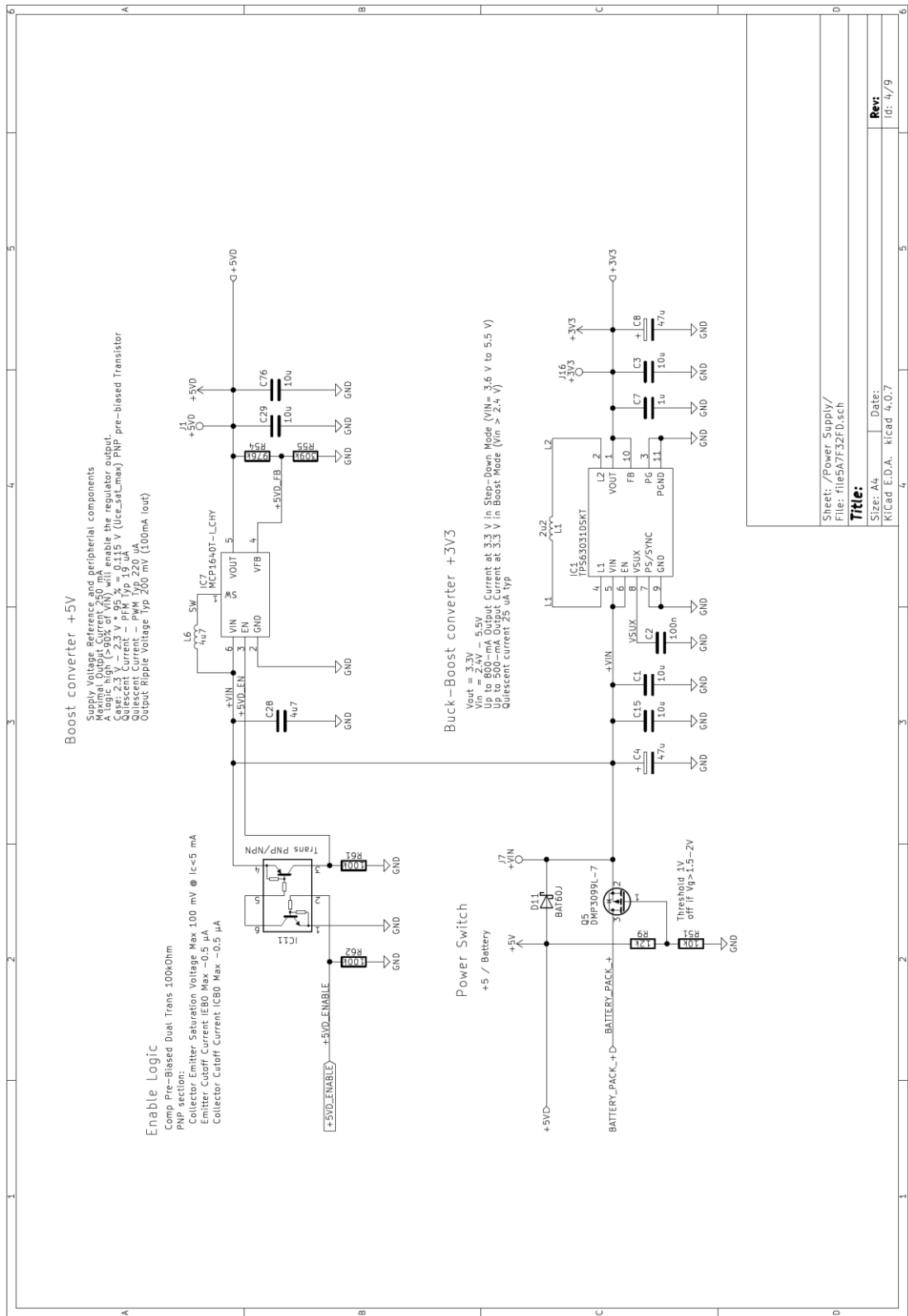
SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

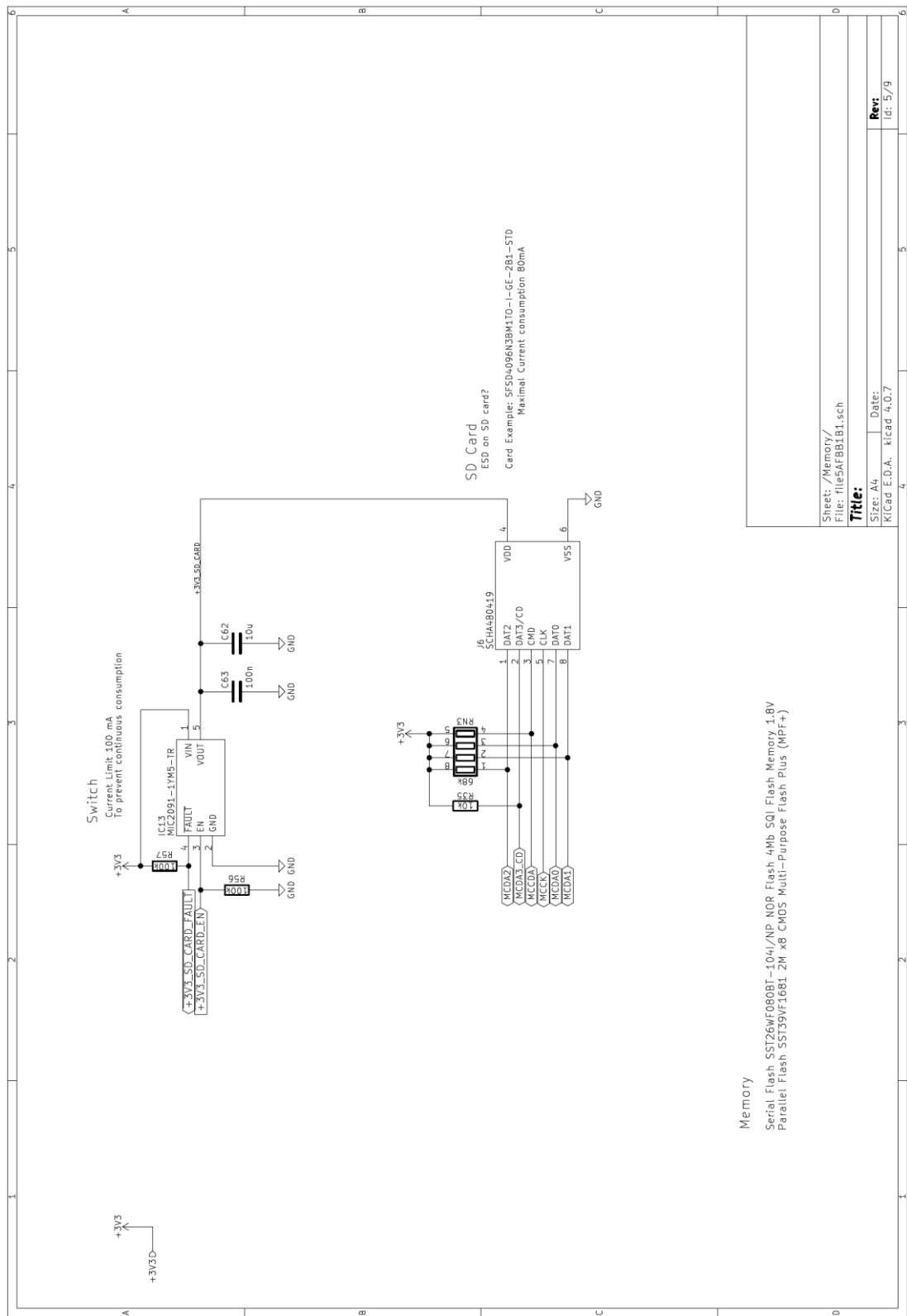
f	Signál v časové oblasti.
F	Signál ve frekvenční oblasti.
USB	Universal Serial Bus, Univerzální sériová sběrnice
MFS	Multifunctional sensor, multifunkční sensor.
LPWAN	Low Power Wide Area Network, nízko výkonová datová komunikační síť sloužící v rozlehlé geografické oblasti.
BPS	Bit per second, bitů za sekundu.
MCU	Microcontroller Unit, mikroprocesorová řídicí jednotka
ADC	Analog to Digital Conversion, převod signálu z analogového na digitální
NDIR	non-dispersive infrared absorbance, nedisperzní absorpce infračerveného světla
UART	Universal asynchronous receiver/transmitter, Asynchronní sériové rozhraní
IR	infrared, infračervené
USART	Universal Synchronous/Asynchronous Receiver and Transmitter, Univerzální Synchronní/Asynchronní sériové rozhraní
EM	Electromagnetic, Elektromagnetické
ITU	International Telecommunication Union, Mezinárodní Telekomunikační unie
IoT	Internet-of-Things, internet věcí
M2M	Machine to Machine, Komunikace mezi stroji
ADR	Adaptive Data Rate, adaptivní přenosová rychlost
RF	Radio Frequency, Radiová frekvence
kbps	kilobit per second, kilobitů za sekundu
PPP	Point-to-Point Protocol, komunikace bod-bod
PMP	Point-to-Multipoint Protocol, komunikace bod-více bodů
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum, technika přímého rozprostřeného spektra
PSRR	Power Supply Rejection Ratio, je schopnost obvodu potlačit pronikání šumu ze vstupu obvodu na jeho výstup
LDO	Low-Dropout, lineární stabilizátor napětí s nízkým úbytkem napětí v propustném směru
MPPT	Maximum power point tracking
RTD	Resistance Temperature Detector, odporový teplotní detektor
PGA	Programable Gain Amplifier, programovatelný analogový zesilovač
DPS	Deska plošných spojů
IDE	integrated development environment, vývojové prostředí

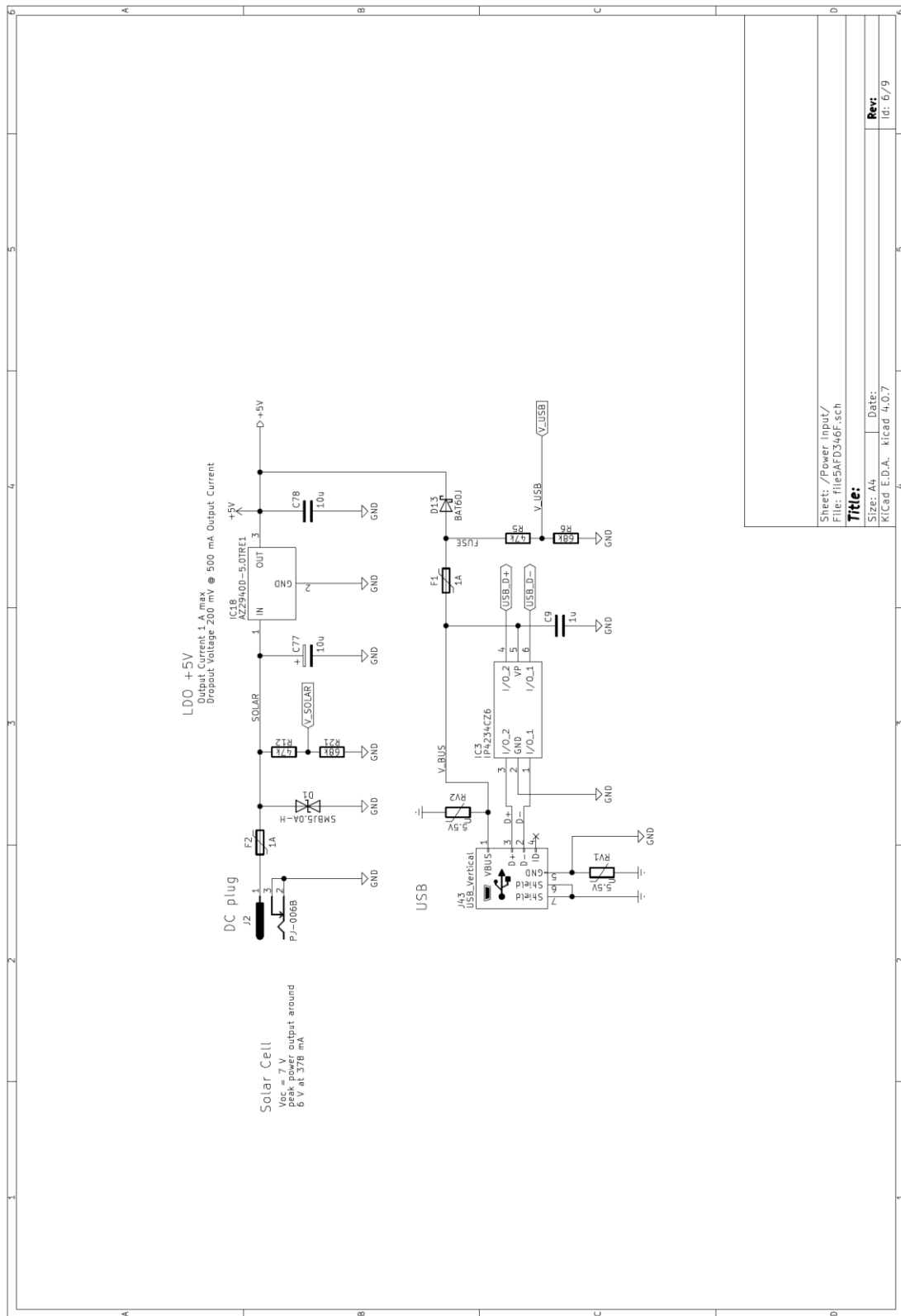
A SCHÉMATA

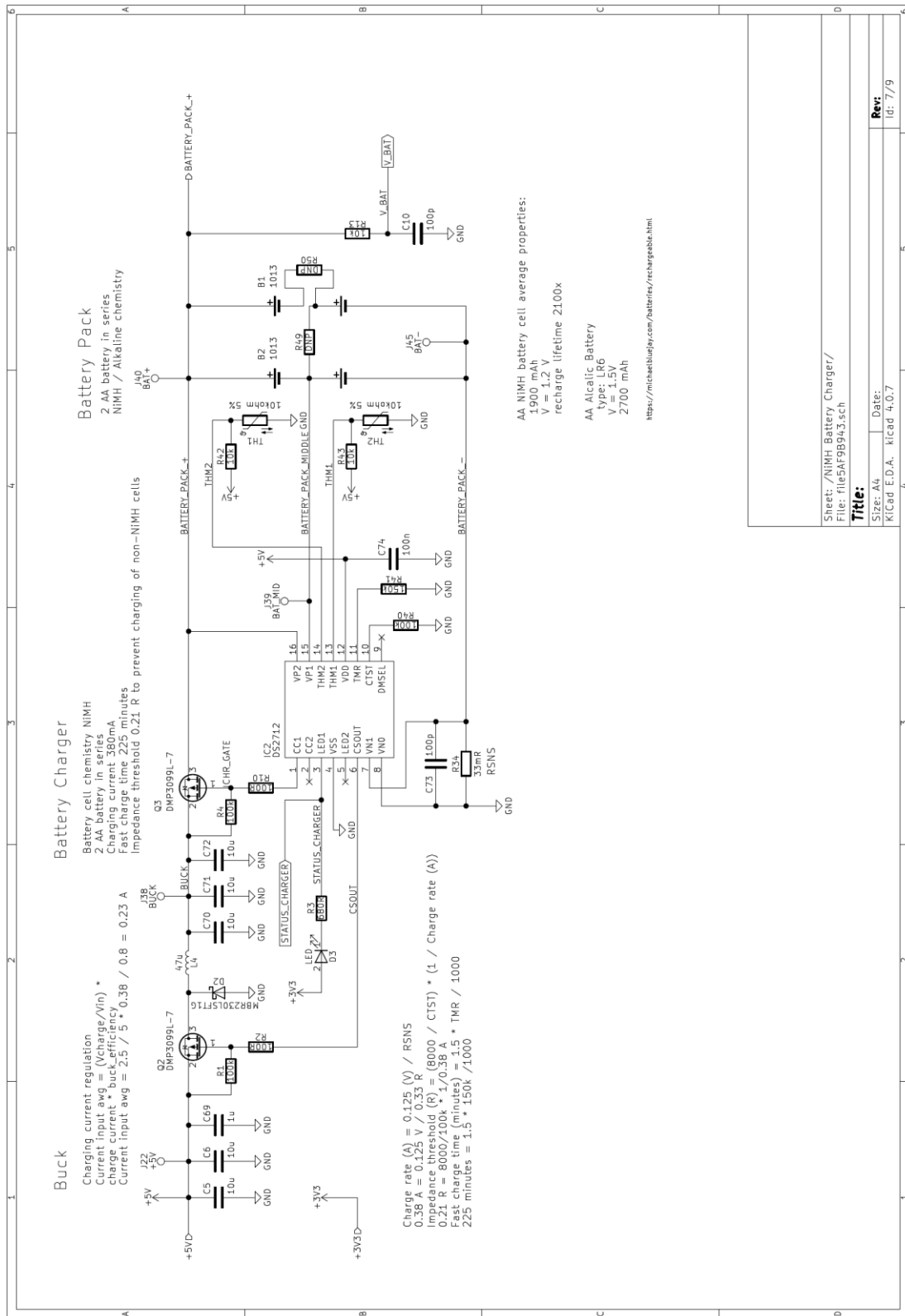


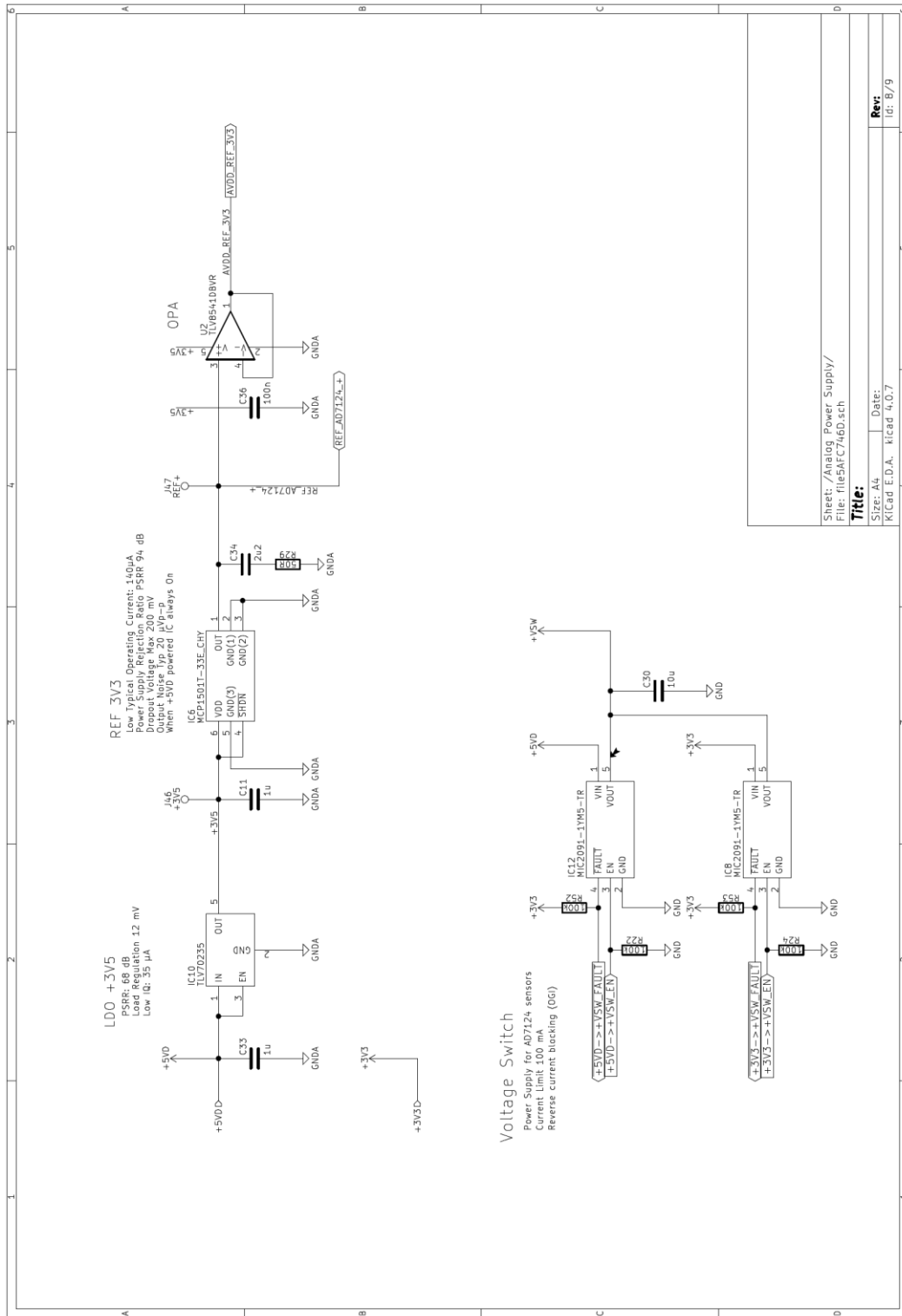










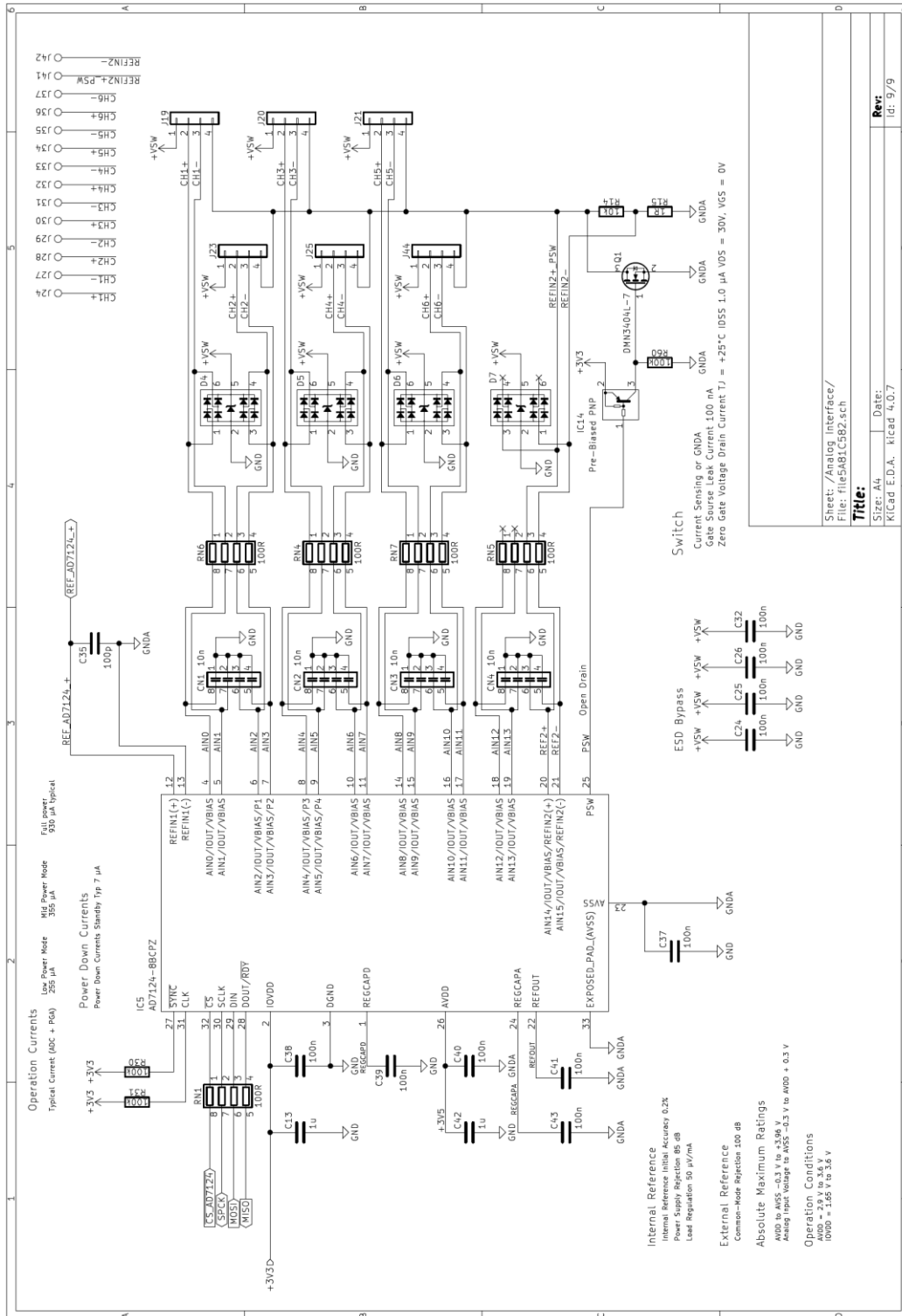


Sheet: /Analog Power Supply/
 File: file5AFC746D.sch

Title:

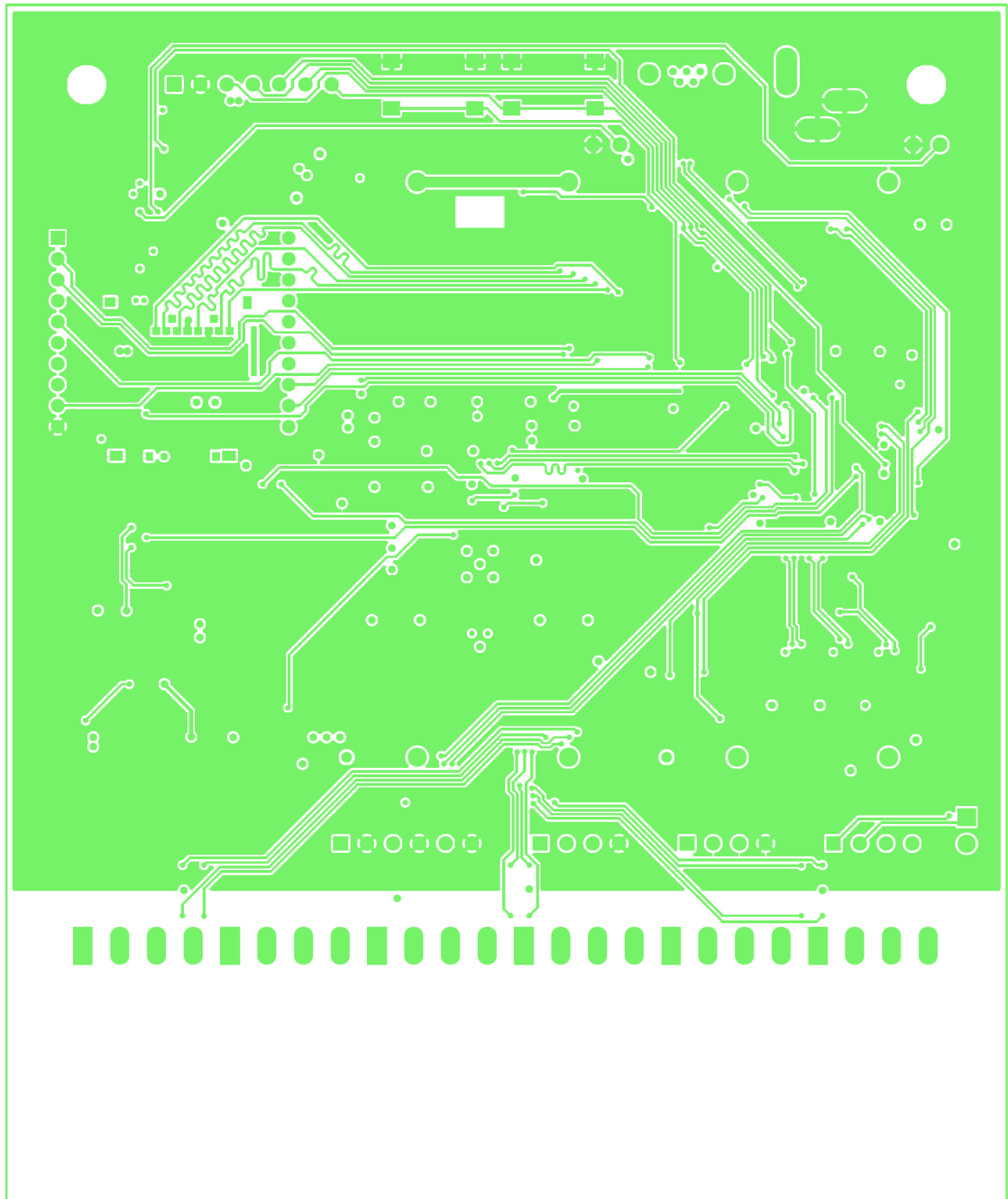
Size: A4 Date: Kicad E.D.A. Kicad 4.0.7

Rev:
 Id: 8/9

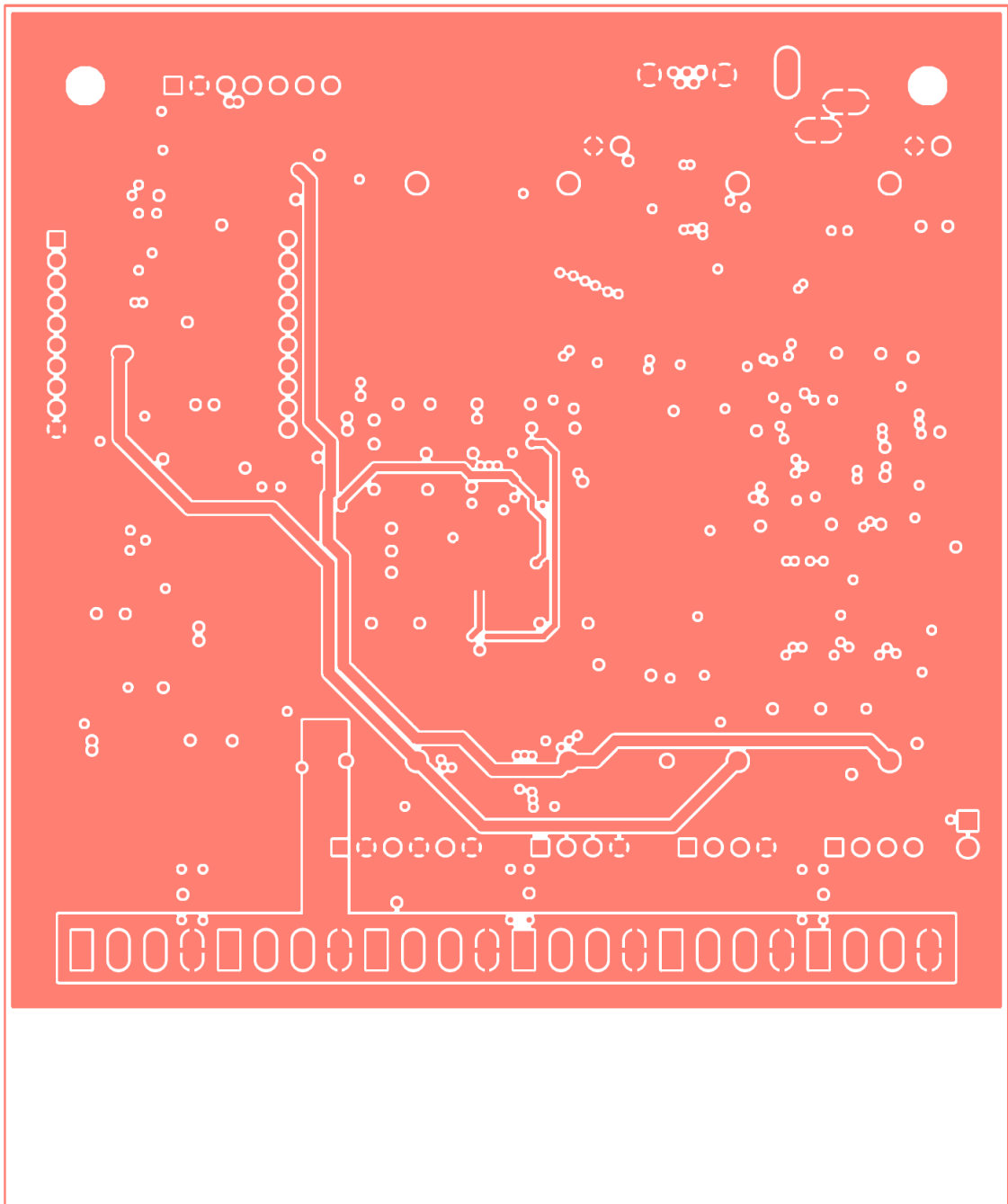


B DESKY

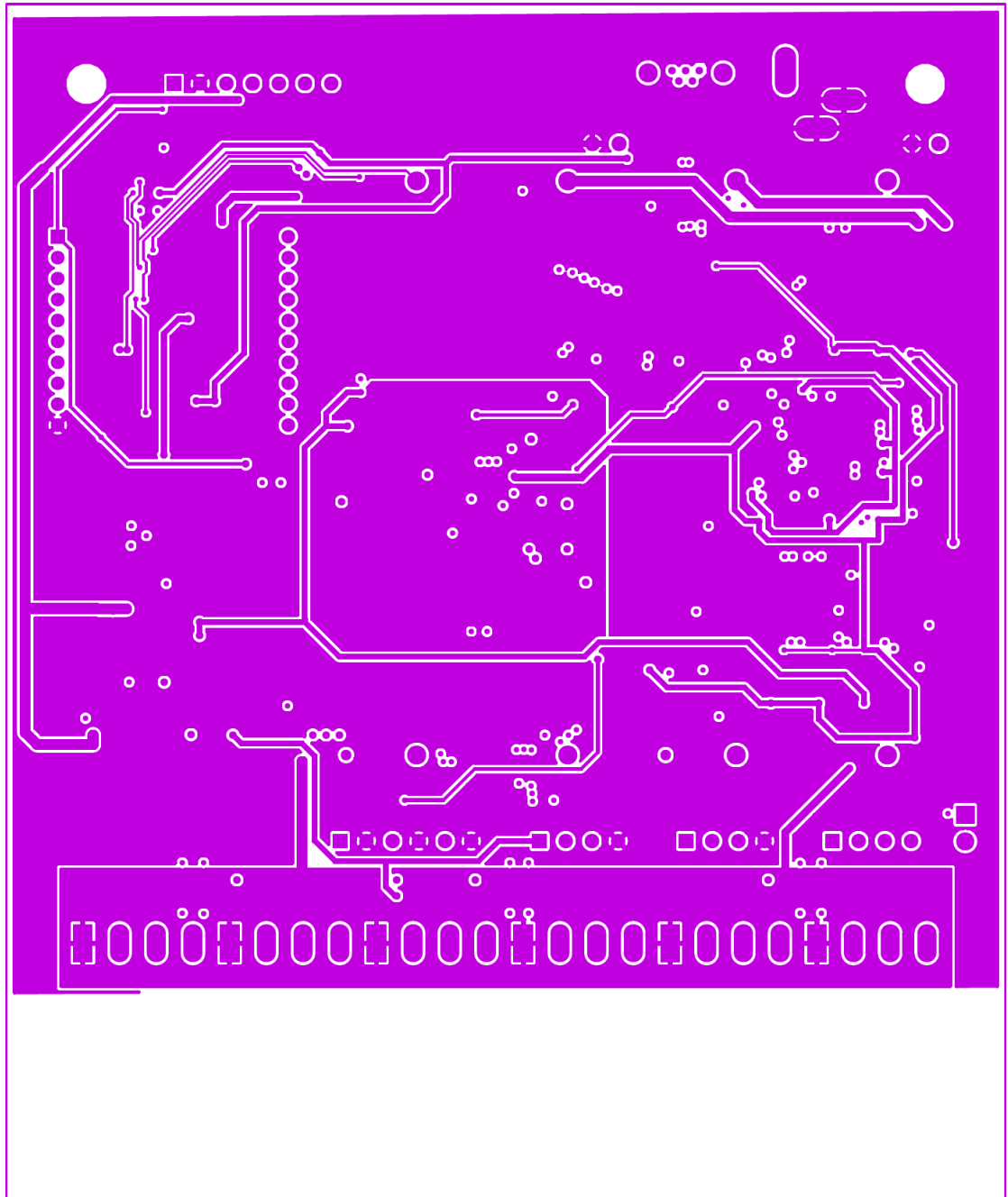
Top layer



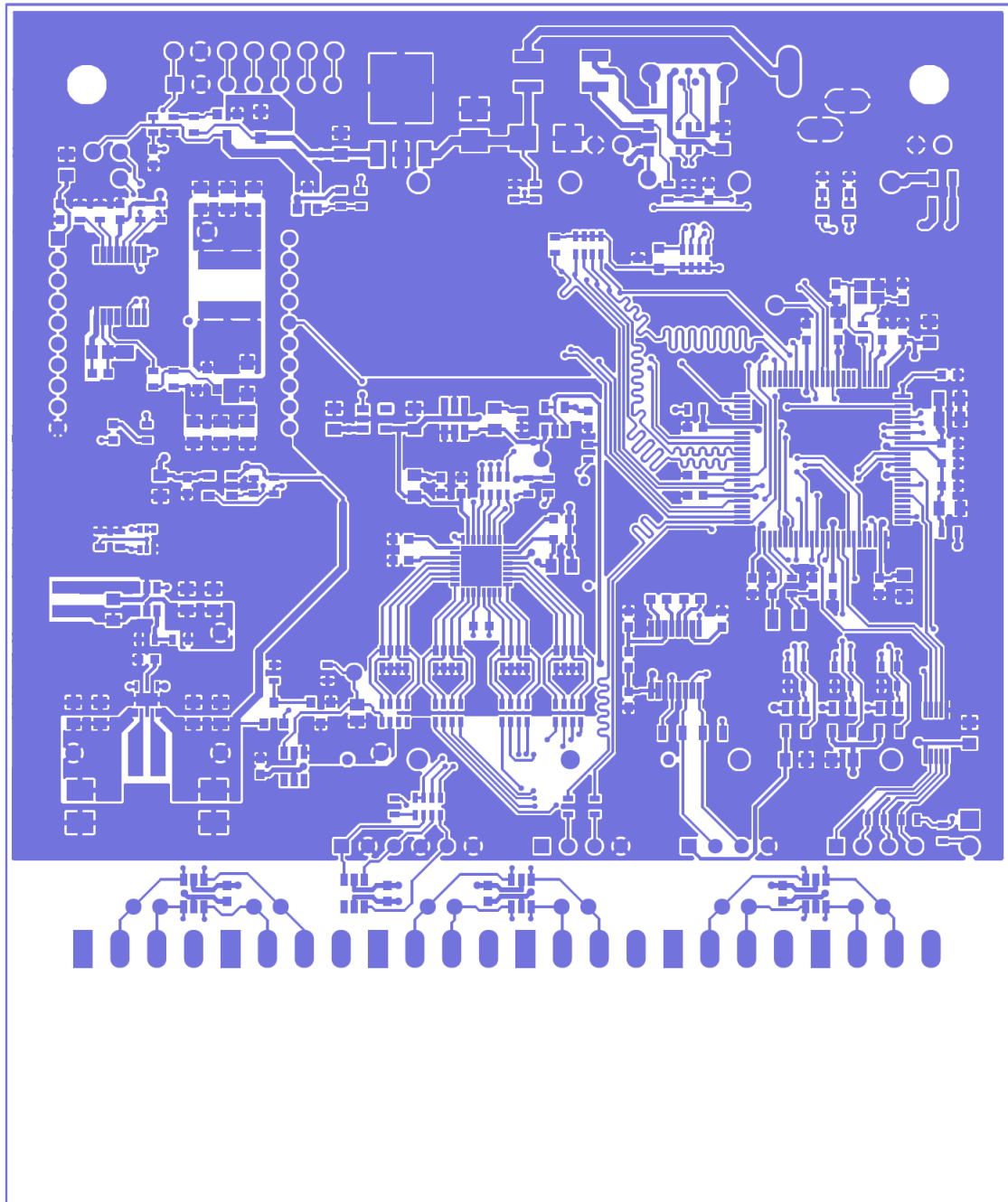
Inner layer 1



Inner layer 2



Bottom layer



C SEZNAM SOUČÁSTEK

Item	Qty	Reference (s)	Value	Manufacturer_Name	Manufacturer_Part_Number
1	2	B1, B2	1013	Keystone Electronics	1013
2	14	C1, C3, C5, C6, C15, C29, C30, C62, C70, C71, C72, C75, C76, C78	10u		
3	34	C2, C16, C17, C18, C19, C21, C22, C24, C25, C26, C31, C32, C36, C37, C38, C39, C40, C41, C43, C48, C49, C50, C51, C52, C55, C56, C59, C60, C63, C64, C65, C66, C68, C74	100n		
4	2	C4, C8	47u	AVX	TAJB476M010TNJ
5	8	C7, C9, C11, C13, C20, C33, C42, C69	1u		
6	4	C10, C23, C35, C73	100p		
7	1	C14	DNP		
8	6	C28, C53, C57, C58, C61, C67	4u7		
9	2	C34, C54	2u2		
10	4	C44, C45, C46, C47	10p		
11	1	C77	10u	AVX	TAJB106K025RNJ

12	4	CN1, CN2, CN3, CN4	10n	AVX	W3A41C103K4T2A
13	1	D1	SMBJ5.0A-H	Bourns	SMBJ5.0A-H
14	1	D2	MBR230LSFT1G	ON Semiconductor	MBR230LSFT1G
15	3	D3, D9, D10	LED	Kingbrighth	APHD1608LCGCK
16	5	D4, D5, D6, D7, D8	D5V0F4U6SO-7	Diodes Inc.	D5V0F4U6SO-7
17	2	D11, D13	BAT60J	STMicroelectronics	BAT60JFILM
18	2	F1, F2	1A	Bourns	MF-USMF050-2
19	1	IC1	TPS63031DSKT	Texas Instruments	TPS63031DSKT
20	1	IC2	DS2712	Maxim Integrated	DS2712E+T&R
21	1	IC3	IP4234CZ6	Nexperia	IP4234CZ6,125
22	1	IC4	ATSAM3S4C	Microchip	ATSAM3S4
23	1	IC5	AD7124-8BCPZ	Analog Devices	AD7124-8BCPZ
24	1	IC6	MCP1501T-33E_CHY	Microchip	MCP1501T-33E/CHY
25	1	IC7	MCP1640T-I_CHY	Microchip	MCP1640T-I/CHY
26	4	IC8, IC12, IC13, IC16	MIC2091-1YM5-TR	Microchip	MIC2091-1YM5-TR
27	1	IC9	ISL3170E	Renesas / Intersil	ISL3170EIUZ
28	1	IC10	TLV70237DBVR	Texas Instruments	TLV70237DBVR
29	1	IC11	Trans PNP/NPN	Diodes Incorporated	DCX144EU-7-F
30	1	IC14	Pre-Biased PNP	ROHM Semiconductor	DTA114YCAHZGT116
31	1	IC15	Xbee Module	DIGI	
32	1	IC17	STM1818SWX7F	STMicroelectronics	STM1818SWX7F
33	1	IC18	AZ2940D-5.0TRE1	Diodes Incorporated	AZ2940D-5.0TRE1
35	1	J2	PJ-006B	CUI	PJ-006B
36	3	J3, J15, J26	SPOX-4	Molex	22-03-5045
39	1	J6	SCHA4B0419	ALPS	SCHA4B0419
44	1	J11	SPOX-6	Molex	22-03-5065
48	1	J17	Conn_01x02		
49	1	J18	SPOX-7	Molex	22-03-5075
50	6	J19, J20, J21, J23, J25, J44	Conn_01x04	Phoenix Contact	1988972
56	1	J43	USB_Vertical	WÄ¼rth Elektronik	614105150621
60	1	L1	2u2	Taiyo Yuden	LQH3NPZ2R2MMEL
61	2	L3, L5	10u/100mA		
62	1	L4	47u	Taiyo Yuden	NR6045T470M
63	1	L6	4u7	Taiyo Yuden	LQH3NPZ4R7MMEL
64	1	Q1	DMN3404L-7	Diodes Incorporated	DMN3404L-7

65	3	Q2, Q3, Q5	DMP3099L-7	Diodes Incorporated	DMP3099L-7
66	16	R1, R4, R11, R22, R24, R26, R30, R31, R40, R52, R53, R56, R57, R60, R61, R62	100k		
67	2	R2, R10	100R		
68	2	R3, R46	680R		
69	2	R5, R12	47k		
70	2	R6, R21	68k		
71	3	R7, R8, R45	DNP		
72	1	R9	12k		
73	5	R13, R35, R42, R43, R51	10k		
74	1	R14	10k		
75	1	R15	1R		
76	1	R16	1k		
77	4	R17, R23, R49, R50	DNP		
78	1	R25	120R		
79	1	R29	50R		
80	2	R32, R33	0R		
81	1	R34	33mR	Yageo	PE0805FRF070R033L
82	2	R36, R37	75R		
83	1	R41	150k		
84	1	R47	750R		
85	1	R54	976k		
86	1	R55	309k		
87	6	RN1, RN4, RN5, RN6, RN7, RN8	100R		
88	1	RN2	100k		
89	1	RN3	68k		
90	2	RV1, RV2	5.5V	Bourns	CG0603MLA-5.5ME
91	2	SW1, SW2	SW_Push		
92	2	TH1, TH2	10kohm 5%	Vishay / BC Components	NTCLE213E3103JHBO
93	1	U1	ICL3221E	Renesas / Intersil	ICL3221EIVZ-T
94	1	U2	TLV8541DBVR	Texas Instruments	TLV8541DBVR
95	1	Y1	12MHz	Kyocera	CX2520DB12000D0GPS C1

96	1	Y2	32.768kHz	ABRACON	ABS07W-32.768kHz-D-2-T
97	2	JX	M22-7131042	Harwin	M22-7131042

D PŮDNÍ SENSORY

Platné k 15.11. 2017

Půdní sensory																
Název senzoru	Výrobce	Princip měření		Druh měření				Rozsah měření			Přenos měření			Rozhraní	Použití s datalogry	Cena
		TDF / FDR	Teplota	Vlhkost	Vodivost	Teplota [°C]	Vlhkost [%]	Vodivost [ds/m]	Teplota [%]	Vlhkost [%]	Vodivost [%]					
STM	DECAGON DEVICES	FDR	ANO	ANO	NE	-40 do 50	0 do 80	-	1	3	-		RS232, SDI-12	Em50, Em50R, Procheck	6699	
10HS	DECAGON DEVICES	FDR	NE	ANO	NE	-	0 do 50	-	-	3	-		analog	Em5b, Em50, Procheck, ECH20	4828	
EC-5	DECAGON DEVICES	TDR	NE	ANO	NE	-	0 do 100	-	-	2	-		analog	Em5b, Em50, Procheck, ECH20	4289	
5TE	DECAGON DEVICES	FDR	ANO	ANO	ANO	-40 do 60	0 do 80	0 do 23	1	3	10		SDI-12	Em50, Em50R, Procheck	8508	
G53	DECAGON DEVICES	FDR	ANO	ANO	ANO	-40 do 50	0 do 80	0 do 23	1	3	10		SDI-12	Em50, Em50R, Procheck	10877	
SM150	AT Delta-T Devices Ltd	FDR	NE	ANO	NE	-	0 do 80	-	-	3	-		analog, digital	HH150, HH2, DL2e, DL6, GP1	6901	
SM300	AT Delta-T Devices Ltd	FDR	NE	ANO	NE	-	0 do 50	-	-	2,5	-		analog, digital	HH2, DL2e, DL6, GP1	11068	
M3	AT Delta-T Devices Ltd	FDR	ANO	ANO	NE	-20 do 40	0 do 100	-	0,5	1	-		analog, digital	HH2, DL2e, DL6, GP1	15772	
WE1-2	AT Delta-T Devices Ltd	FDR	ANO	ANO	ANO	-	-	-	1	3	-		pouze pro data logger	HH2	29931	
PICO 64/32	IMCO	TDR	ANO	ANO	NE	-15 do 50	0 do 100	-	0,3	1	-		analog		20941	
Specifický komunikační kabel určen pro jednoúčelné aplikace s daným typem data loggeru, nebo pro připojení do svorkovnic																
Určita univerzálnost z důvodu stejného konektoru a digitálního rozhraní																
Každý senzor zpravidla požaduje jinou hodnotu napájecího napětí. Stejně tak výstupy (analog, digitál) mají různé napěťové úrovně																

E PŮDNÍ DATALOGGERY

Platné k 15.11. 2017

Dataloggery			
Název	Výrobce	Typ	Cena
			[Kč]
EasyLog	PHYSICUS	analog, digital	23328
Em5b	DECAGON DEVICES	analog	9142
Em50, Em50R	DECAGON DEVICES	analog, digital	15229
HH2	AT Delta-T Devices LTd	analog, digital	-
GP1	AT Delta-T Devices LTd	analog, digital	16906
GP2	AT Delta-T Devices LTd	analog, digital	58652

F RTD MĚŘENÍ

Kalibrace sensorů dvoubodová v kapalině s referenčními teplotami (0 °C, 60 °C).

Následně se kalibrační hodnoty nahrají do kalibrovaného zařízení (sensoru).

Komunikace pomocí terminálu.

Důvod, proč je, že rezistory nemají stejné hodnoty z důvodu výrobních tolerancí.

Tedy průchodem referenčního proudu vzniká na každém rezistoru jiný úbytek napětí.

Rozdíl napětí se pak objevuje na vstupu AD převodníku, kde způsobuje chybu měření.

Řešením je rezistory nepoužívat, nebo použít rezistory s nižší nominální hodnotou cca

do 100 Ω a s přesné řady 0.5% a méně plus teplotní koeficient 100ppm a méně. V tom případě pak nesymetrie rezistorů bude mít minimální vliv na výsledky měření teploty.

Maximální tolerance vlivem nesymetrie rezistorů ±0.1 °C, při použití 50 Ω ±0.5 %.

Avšak rezistory v sérii snižují šum na vstupu AD.

Při měření na stejném měřicím kanálu s různou délkou kabelu a stejném sensoru není patrná odchylka měření.

Při měření nebyl ani na jeden kanál aplikován teplotní *offset*.

Teplotní koeficient $3.851 \frac{\Omega}{^{\circ}\text{C}}$

Referenční rezistor R_{ref} 22 kΩ ±1 %, pro výpočet jsem počítal s hodnotou 21988 Ω.

Zisk(Gain) = 16

$$t = \frac{R_{Pt1000} - 1000}{3.851} + offset$$

$$R_{Pt1000} = \frac{R_{ref}}{Gain} * ADC_data$$

time	GMH 3250	GTH 175/ Pt	Pt1000 kratky kabel	Pt1000 dlouhý kabel
	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
10:24	7	7.1	7.03	7.06
10:29	12.1	12.2	12.025	12.07
10:32	16.2	16.1	16.044	16.086
10:36	19.5	19.5	19.423	19.475
10:39	25.2	25.3	25.223	25.286
10:42	30.6	30.6	30.621	30.67
10:48	38.2	38.2	38.172	38.228
10:50	41.7	41.7	41.717	41.755
10:53	45.7	45.8	45.731	45.789
10:56	49.9	49.9	49.922	49.965
11:01	54.1	54.2	54.162	54.189
11:03	56.4	56.4	56.396	56.445
11:06	59.3	59.3	59.292	59.341